“钱学森系统科学思想文库”序

钱学森是中国现代史上一位杰出的科学家，同时也是一位杰出的思想家。

在长达70多年丰富多彩的科学生涯中，钱学森曾建树了许多科学丰碑，对现代科学技术发展和我国社会主义现代化建设做出了杰出贡献。钱学森对我国火箭、导弹和航天事业的开创性贡献，是众所周知的，人们称他为“中国航天之父”。但从钱学森全部科学成就与贡献来看，这只是其中的一部分。实际上钱学森的研究领域十分广泛，从科学、技术、工程直到哲学的不同层次上，在跨学科、跨领域和跨层次的研究中，特别是不同学科、不同领域的相互交叉、结合与融合的综合集成研究方面，都做出了许多开创性的独特贡献。而钱学森在这些方面的科学成就与贡献，从现代科学技术发展来看，其意义和影响可能更大也更深远。

钱学森的科学历程大体上可分为三个阶段。第一个阶段是从20世纪30年代中到50年代中。这二十年是在美国度过的，主要从事自然科学技术研究，特别是在应用力学、喷气推进以及火箭与导弹研究方面，取得了举世瞩目的成就。与此同时，还创建了物理力学和工程控制论，成为当时国际上著名的科学家，这些成就与贡献形成了钱学森的第一个创造高峰。

值得指出的是，从现代科学技术发展来看，工程控制论已不完全属于自然科学领域，而属于系统科学范畴。自然科学是从物质在时空中运动的角度来研究客观世界的。而工程控制论要研究的并不是物质运动本身，而是研究代表物质运动的事物之间的关系，研究这些关系的系统性质。因此，系统和系统控制是工程控制论所要研究的基本问题。钱学

森创建工程控制论这个事实表明，在这个时期，钱学森已开始进行跨学科、跨领域的研究，并取得了重要成就。《工程控制论》一书的出版，在国际学术界引起了强烈反响，立即被译成多种文字出版发行。工程控制论所体现的科学思想、理论方法与应用，直到今天仍然深刻地影响着系统科学与系统工程、控制科学与工程以及管理科学与工程等的发展。

第二阶段是20世纪50年代中至80年代初。这一时期钱学森的主要精力集中在开创我国火箭、导弹和航天事业上。这个时期工作更多的是工程实践，要研制和生产出型号产品来。航天科学技术与工程具有高度的综合性，需要广泛地应用自然科学领域中多种学科和技术并综合集成到工程实践中。由于钱学森在自然科学领域中的渊博知识以及高瞻远瞩的科学智慧，使他始终处在这一事业的“科技主帅”位置上。在周恩来、聂荣臻等老一辈无产阶级革命家的直接领导下，钱学森的科学才能和智慧得以充分发挥，并和广大科技人员一起，在当时十分艰难的条件下，研制出我国自己的导弹和卫星来，创造出国内外公认的奇迹，这是钱学森的第二个创造高峰。

这里需要强调的是，以“两弹一星”为代表的大规模科学技术工程，如何把成千上万人组织起来，并以较少的投入在较短的时间内，研制出高质量可靠的型号产品来，这就需要有一套科学的组织管理方法与技术，在当时这是一个十分突出的问题。钱学森在开创我国航天事业的过程中，同时也开创了一套既有中国特色又有普遍科学意义的系统工程管理方法与技术。当时，在研制体制上是研究、规划、设计、试制、生产和试验一体化；在组织管理上是总体设计部和两条指挥线的系统工程管理方式。实践已证明了这套组织管理方法是十分有效的。从今天的角度来看，这就是在当时的条件下，把科学技术创新、组织管理创新与体制机制创新有机结合起来，实现了综合集成创新，从而走出了一条发展我国航天事业的自主创新道路。我国航天事业一直在持续发展，现已发展到了载人航天阶段，其根本原因就在于自主创新。

航天系统工程的成功实践，证明了系统工程的理论与方法的科学性和有效性，它不仅适用于自然工程，同样也适用于社会工程。系统工程的应用与实践也是钱学森对管理科学与工程的重要贡献。

第三阶段是20世纪80年代初到现在。80年代初，钱学森从科研一线领导岗位上退下来以后，就把自己的全部精力投入到学术研究之中。这一时期，钱学森学术思想之活跃、涉猎学科之广泛，原创性之强，在学术界是十分罕见的。他通过讨论班、学术会议以及与众多专家、学者书信往来的学术讨论中，提出了许多新的科学思想和方法、新的学科与领域，并发表了大量文章，出版了多部著作，产生了广泛的

学术影响。这些成就与贡献也就形成了钱学森的第三次创造高峰。

在这个阶段，钱学森花费心血最多也最具有代表性的是他建立系统科学体系和创建系统学的工作。从现代科学技术发展趋势来看，一方面是已有学科不断分化，越分越细，新学科、新领域不断产生，呈现出高度分化的特点；另一方面是不同学科、不同领域之间相互交叉、结合与融合，向综合性、整体化的方向发展，呈现出高度综合的趋势。这两者是相辅相成、相互促进的。系统科学就是这后一发展趋势中，最有基础性的学问。钱学森不仅善于从各学科、各领域吸收营养来构建系统科学，如创建系统学、发展系统工程技术等，而且又能从系统科学角度和综合集成思想去思考一些学科和领域的发展，从而提出新的学科和新的领域。如把人脑作为复杂巨系统来研究，提出了"思维科学"；把地球表层作为复杂巨系统来研究，提出了"地理科学"；把人体作为复杂巨系统来研究，提出了"人体科学"等等。这些新的学科和领域不仅与原来相关的学科和领域是相洽的，同时还融入了新的科学思想和科学方法。

在钱学森的科学理论与科学实践中，有一个非常鲜明的特点，就是他的系统思维和系统科学思想。在这个阶段，钱学森的系统科学思想和系统方法有了新的发展，达到了新的高度，进入了新的阶段。特别是钱学森的综合集成思想和综合集成方法，已贯穿于工程、技术、科学直到哲学的不同层次上，形成了一套综合集成体系。综合集成思想与综合集成方法的形成与提出，是一场科学思想和科学方法上的革命，其意义和影响将是广泛而深远的。

钱学森的科学成就与贡献不仅充分反映出他的科学创新精神，同时也深刻体现了他的科学思想和科学方法。这是我们宝贵的知识财富和精神财富，值得我们认真学习和研究，以便把他所开创的科学事业继续发展下去并发扬光大。正是由于这个原因，中国系统工程学会和上海交通大学联合编辑出版"钱学森系统科学思想文库"（以下简称"文库"）。出版这套"文库"的目的，一方面是为广大读者学习和研究钱学森科学思想、科学方法和科学精神提供系统的文献资料；另一方面，我们也将以此书献给今年九十五岁高龄的人民科学家钱学森，并祝他健康长寿。

"文库"收集了钱学森在不同时期有关系统科学的主要著作和文章。包括《工程控制论》（科学出版社，1958 年）、《论系统工程》（增订本，湖南科学技术出版社，1988 年）、《创建系统学》（山西科学技术出版社，2001 年）。这三本书构成了"文库"的一、二、三卷。按照系统科学体系结构，工程控制论是处在技术科学层次上，系统工程属于应用技术，而系统学则属于基础理论层次。从这个角度来看，这三卷著作集中反映了钱学森在系统科学及其不同层次上的科学成就与贡献，我们可以从中学习和研

究钱学森的系统科学思想、系统方法、系统理论、系统技术与系统应用。这三本著作，曾经培育和影响了几代在这个领域中从事研究工作的专家、学者。他们之中的一些同志，应邀为“文库”出版撰写了自己的研究心得与成果。将这些文章编辑成册就构成了“文库”的第四卷，即《钱学森系统科学思想研究》。

编辑出版这套“文库”，是由中国系统工程学会和上海交通大学联合组织进行的。中国系统工程学会理事长陈光亚研究员、副理事长于景元研究员、涂元季高级工程师和上海交通大学党委副书记潘敏同志、王浣尘教授并邀请中国科学院自动化研究所戴汝为院士、中国科学院系统科学研究所顾基发研究员、北京大学哲学系冯国瑞教授、上海理工大学和上海系统科学研究院车宏安教授共同组成了“文库”编委会。“文库”第一卷由戴汝为负责，第二卷由顾基发负责，第三卷由冯国瑞负责，第四卷由车宏安负责。“文库”的整个组织协调工作由于景元、涂元季负责。在“文库”编辑出版过程中，北京大学朱照宣教授、中国人民大学苗东升教授、二炮装备研究院赵少奎研究员，积极提供了有关资料并参与讨论，为这套“文库”的出版作出了贡献，在此向他们表示衷心的感谢。

编辑出版这套“文库”是一项艰难的工作，我们为此也作了很大努力，力求把这一工作做好。但由于我们水平有限，难免会有这样或那样的缺点和不足，甚至是错误之处。希望读者在阅读和学习“文库”之后，如有发现，请给予批评和指正，我们将十分感谢。

“钱学森系统科学思想文库”编委会

2006年11月

目　录

钱学森综合集成体系

于景元

中国航天科技集团公司710研究所，北京，100037

众所周知，钱学森的研究领域十分广泛，从科学、技术、工程直到哲学的不同层次上，在跨学科、跨领域和跨层次的研究中，特别是不同学科、不同领域的相互交叉、结合与融合的综合集成研究方面，都做出了许多开创性的独特贡献。系统科学的成就与贡献就是其中的一个重要方面。

20世纪80年代初，钱老从科研一线领导岗位上退下来以后，就把自己全部精力投入到学术研究之中。这一时期，钱老学术思想之活跃、涉猎学科之广泛，原创性之强，在学术界是十分罕见的。他通过讨论班、学术会议以及与众多专家、学者书信往来的学术讨论中，提出了许多新的科学思想和方法、新的学科与领域，并发表了大量文章出版了多部著作，产生了广泛的学术影响。

在这一时期，钱老花费心血最多也最具有代表性的是他建立系统科学体系和创建系统学的工作。从现代科学技术发展趋势来看，一方面是已有学科不断分化，越分越细，新学科、新领域不断产生，呈现出高度分化的特点；另一方面是不同学科、不同领域之间相互交叉、结合与融合，向综合性整体化的方向发展，呈现出高度综合的趋势。这两者是相辅相成、相互促进的。系统科学就是这后一发展趋势中，最有基础性的学问。钱老不仅善于从前一发展趋势中各学科、各领域吸收营养来构建系统科学，如创建系统学、发展系统工程技术等，而且又能从系统科学角度和综合集成思想去思考一些学科和领域的发展，从而提出新的学科和新的领域。如把人脑作为复杂巨系统来研究，提出了“思维科学”；把地球表层作为复杂巨系统来研究，提出了“地理科学”；把人体作为复杂巨系统来研究，提出了“人体科学”等等。而且这些新的学科和领域不仅和原来相关的学科和领域是相洽的，同时还融入了新的科学思想和科学方法。

在钱学森的科学理论与科学实践中，有一个非常鲜明的特点，就是他的系统思维和系统科学思想。在这个时期，钱学森的系统科学思想和系统方法有了新的发展，达到了新的高度，进入了新的阶段，特别是钱学森的综合集成思想和综合集成方法，已贯穿于工程、技术、科学直到哲学的不同层次上，形成了一套综合集成体系。综合集成思想与综合集成方法的形成与提出，是一场科学思想和科学方法上的革命，其意义和影响将是广泛而深远的。

下面，从三个方面对钱学森综合集成体系进行一些讨论。

一、综合集成思想与综合集成方法

系统科学和已有的其他科学不同，正如钱老所说的，系统科学就是从局部与整体、局部与系统这样一个观点去研究客观世界的[1]。客观世界包括自然、社会和人自身。能反映事物这个特征最基本的重要概念就是系统，所以系统也就成为系统科学研究和应用的主要对象。这与自然科学、社会科学、人文科学等不同，系统科学能把这些科学领域研究的问题联系起来作为系统进行综合性整体研究。这就是为什么系统科学具有交叉性、综合性、整体性和横断性的原因，也正是这些特点使系统科学处在现代科学技术发展的综合性整体化的方向上。

所谓系统是指由一些互相关联、互相作用、互相影响的组成部分所构成的具有某些功能的整体，这是国内外学术界普遍公认的科学概念。这样定义的系统在自然界、人类社会包括人自身是普遍存在的。钱老根据系统结构的复杂性，提出了新的系统分类，将系统分为简单系统、简单巨系统、复杂巨系统、特殊复杂巨系统——社会系统。

系统的一个重要特点，就是系统在整体上具有其组成部分所没有的性质，这就是系统的整体性。系统整体性的外在表现就是系统功能。系统的这个性质意味着，对系统组成部分都认识了，并不等于认识了系统整体，系统整体性不是它组成部分性质的简单“拼盘”。

系统科学研究表明，系统内部结构和系统外部环境以及它们之间的关联关系，决定了系统整体性和功能。从理论上来看，研究系统结构与环境如何决定系统整体性和功能，揭示系统存在、演化、协同、控制与发展的一般规律，就成为系统学，特别是复杂巨系统学的基本任务。国外关于复杂性的研究，正如钱老指出的是开放复杂巨系统的动力学问题，实际上也是属于这方面的探索。

另一方面，从应用角度来看，根据上述性质，为了使系统具有我们期望的功能，特别是最好的功能，我们可以通过改变和调整系统结构或系统环境以及它们之间关联关系来实现。但系统环境并不是我们想改变就能改变的，只能主动去适应。而系统结构却是我们能够改变、调整和设计的。这样，我们便可以通过改变、调整系统组成部分或组成部分之间、层次结构之间以及与系统环境之间的关联关系，使它们相互协调与协同，从而在整体上涌现出我们满意的和最好的功能，这就是系统控制、系统干预（intervention）、系统组织管理的基本内涵，也是控制工程、系统工程等所要实现的主要目标。

对于系统科学来说，一个是要认识系统，另一个是在认识系统基础上，去改造、设计和运用系统，这就要有科学方法论的指导和科学方法的运用。

钱学森是一位高度重视科学方法论与方法的科学家，也善于从方法论角度来处理问题，如对目前国内外都高度重视但又认识不一致的复杂性研究，钱老却从方法论角度给出了清楚的界定，他指出，凡现在不能用还原论方法处理的，或不宜用还原论方法处理的问题，都是复杂性问题，复杂巨系统就是这类问题[2]。

对于简单系统和简单巨系统都已有了相应的方法，也有了相应的理论与技术并在继续发展之中。但对复杂巨系统（包括社会系统）却不是已有科学方法所能处理的，需要有新的方法论和方法，这就是钱老一再指出的，这是一个科学新领域。

从近代科学到现代科学的发展过程中，自然科学采用了从定性到定量的研究方法，所以自然科学被称为“精密科学”。而社会科学、人文科学由于研究对象的复杂性，通常采用的是从定性到定性的思辨、描述方法，所以这些学问被称为“描述科学”。当然，这种趋势随着科学技术的发展也在变化，有些学科逐渐向精密化方向发展，如经济学、社会学等。

从方法论角度来看，在这个发展过程中，还原论方法发挥了重要作用，特别在自然科学领域中取得了很大成功。还原论方法是把所研究的对象分解成部分，以为部分研究清楚了，整体也就清楚了。如果部分还研究不清楚，再继续分解下去进行研究，直到弄清楚为止。按照这个方法论，物理学对物质结构的研究已经到了夸克层次，生物学对生命的研究也到了基因层次。毫无疑问这是现代科学技术取得的巨大成就。但现实的情况却使我们看到，认识了基本粒子还不能解释大物质构造，知道了基因也回答不了生命是什么。这些事实使科学家认识到“还原论不足之处正日益明显”[3]。这就是说，还原论方法由整体往下分解，研究得越来越细，这是它的优势方面，但由下往上回不来，回答不了高层次和整体问题，又是它的不足一面。所以仅靠还原论方法还不够，还要解决由下往上的问题，也就是复杂性研究中的所谓涌现问题。著名物理学家李政道对于 21 世纪物理学的发展曾讲过“我猜想 21 世纪的方向要整体统一，微观的基本粒子要和宏观的真空构造、大型量子态结合起来，这些很可能是 21 世纪的研究目标”[4]。这里所说的把宏观和微观结合起来，就是要研究微观如何决定宏观，解决由下往上的问题，打通从微观到宏观的通路，把宏观和微观统一起来。

同样的道理，还原论方法也处理不了系统整体性问题，特别是复杂巨系统（包括社会系统）的整体性问题。从系统角度来看，把系统分解为部分，单独研究一个部分，就把这个部分和其他部分的关联关系切断了。这样，就是把每个部分都研究清楚了，也回答不了系统整体性问题。

意识到这一点更早的科学家是贝塔朗菲，他是一位分子生物学家，当生物学研究已经发展到分子生物学时，用他的话来说，对生物在分子层次上了解得越多，对生物整体反而认识得越模糊。在这种情况下，于 20 世纪 30 年代他提出了整体论方法，强调还是从生物体系统的整体上来研究问题。但限于当时的科学技术水平，支

撑整体论方法的具体方法体系没有发展起来，还是从整体论整体、从定性到定性，论来论去解决不了问题。正如钱老所指出的“几十年来一般系统论基本上处于概念的阐发阶段，具体理论和定量结果还很少”[5]。但整体论方法的提出，确是对现代科学技术发展的重大贡献。

20 世纪 80 年代中期，国外出现了复杂性研究。所谓复杂性其实都是系统复杂性，从这个角度来看，系统整体性，特别是复杂巨系统（包括社会系统）的整体性问题就是复杂性问题。所以对复杂性研究，他们后来也“采用了一个‘复杂系统’的词，代表那些对组成部分的理解不能解释其全部性质的系统。”[3]

国外关于复杂性和复杂系统的研究，在研究方法上确实有许多创新之处，如他们提出的遗传算法、演化算法、开发的 Swarm 软件平台、以 Agent 为基础的系统建模、用数字技术描述的人工生命等等。在方法论上，虽然也意识到了还原论方法的局限性，但并没有提出新的方法论。方法论和方法是两个不同层次的问题。方法论是关于研究问题所应遵循的途径和研究路线，在方法论指导下是具体方法问题，如果方法论不对，再好的方法也解决不了根本性问题。

20 世纪 70 年代末，钱学森明确指出“我们所提倡的系统论，既不是整体论，也非还原论，而是整体论与还原论的辩证统一”[6]。钱老的这个系统论思想后来发展成为他的综合集成思想。根据这个思想，钱老又提出将还原论方法与整体论方法辩证统一起来，形成了系统论方法。在应用系统论方法时，也要从系统整体出发将系统进行分解，在分解后研究的基础上，再综合集成到系统整体，实现 1+1>2 的整体涌现，最终是从整体上研究和解决问题。由此可见，系统论方法吸收了还原论方法和整体论方法各自的长处，同时也弥补了各自的局限性，既超越了还原论方法，又发展了整体论方法。这是钱学森在科学方法论上具有里程碑意义的贡献，它不仅大大促进了系统科学的发展，同时也必将对自然科学、社会科学等其他科学技术部门产生深刻的影响。

钱老深谙西方哲学的精髓，又能吸取中华民族古代哲学的营养，并运用辩证唯物主义创立了系统论方法。他在吸收国外现代科学技术发展成就的同时，又能突破他们的各种局限性，站得比外国科学家更高一些，充分显示出他的科学创新精神。

20 世纪 80 年代末到 90 年代初，钱学森又先后提出“从定性到定量综合集成方法”以及它的实践形式“从定性到定量综合集成研讨厅体系”（以下将两者合称为综合集成方法），并将运用这套方法的集体称为总体部。这就将系统论方法具体化了，形成了一套可以操作的行之有效的方法体系和实践方式。从方法和技术层次上看，它是人-机结合、人-网结合以人为主的信息、知识和智慧的综合集成技术。从应用和运用层次上看，是以总体部为实体进行的综合集成工程。

综合集成方法的实质是把专家体系、信息与知识体系以及计算机体系有机结合起来，构成一个高度智能化的人-机结合与融合体系，这个体系具有综合优势、整体

优势和智能优势。正如钱老指出的，它能把人的思维、思维的成果、人的经验、知识、智慧以及各种情报、资料和信息统统集成起来，从多方面的定性认识上升到定量认识[2]。

钱老提出的人-机结合思维体系是综合集成方法的理论基础。从思维科学角度来看，人脑和计算机都能有效处理信息，但两者有极大差别。关于人脑思维，钱老指出“逻辑思维，微观法；形象思维，宏观法；创造思维，宏观与微观相结合。创造思维才是智慧的源泉，逻辑思维和形象思维都是手段”[2]。今天的计算机在逻辑思维方面确实能做很多事情，甚至比人脑做得还好还快，善于信息的精确处理，已有许多科学成就证明了这一点，如著名数学家吴文俊的定理机器证明。但在形象思维方面，现在的计算机还不能给我们以任何帮助。至于创造思维就只能依靠人脑了。然而计算机在逻辑思维方面毕竟有其优势。如果把人脑和计算机结合起来以人为主的思维方式，那就更有优势，思维能力更强，人将变得更加聪明，它的智慧和创造能力比人要高，比机器就更高，这也是 1＋1＞2 的道理。这种聪明“人”的出现就是钱老所说的，将会出现一个“新人类”，不只是人，是人-机结合的“新人类”[2]。

信息、知识和智慧是三个不同层次的问题。有了信息未必有知识，有了信息和知识也未必就有智慧。信息的综合集成可以获得知识，信息和知识的综合集成可以获得智慧。人类有史以来是通过人脑获得知识和智慧的。现在由于以计算机为主的现代信息技术的发展，我们可以通过人-机结合以人为主的方法来获得信息、知识和智慧，在人类发展史上，这是具有重大意义的进步。综合集成方法就是这种人-机结合获得信息、知识和智慧的方法，它是人-机结合的信息处理系统、人-机结合的知识生产系统、人-机结合的智慧集成系统。按照我国传统文化有“集大成”的说法，即把一个非常复杂的事物的各个方面综合起来，达到对整体的认识，集大成得智慧，所以钱老又把这套方法称为“大成智慧工程”。将大成智慧工程进一步发展，在理论上提炼成一门学问，就是大成智慧学。

从实践论和认识论角度来看，与所有科学研究一样，无论是复杂巨系统（包括社会系统）的理论研究还是应用研究，通常是在已有的科学理论、经验知识基础上与专家判断力（专家的知识、智慧和创造力）相结合，对所研究的问题提出和形成经验性假设，如猜想、判断、思路、对策、方案等等。这种经验性假设一般是定性的，它所以是经验性假设，是因为其正确与否，能否成立还没有用严谨的科学方式加以证明。在自然科学和数学科学中，这类经验性假设是用严密逻辑推理和各种实验手段来证明的，这一过程体现了从定性到定量的研究特点。但对复杂巨系统（包括社会系统）由于其跨学科、跨领域、跨层次的特点，对所研究的问题能提出经验性假设，通常不是一个专家，甚至也不是一个领域的专家们所能提出来的，而是由不同领域、不同学科的专家构成的专家体系，依靠专家群体的知识和智慧，对所研究的复杂巨系统（包括社会系统）问题提出经验性假设。但要证明其正确与否，仅靠自然科学和数学中

所用的各种方法就显得力所不及了。如社会系统、地理系统中的问题，既不是单纯的逻辑推理，也不能进行实验。但我们对经验性假设又不能只停留在思辨和从定性到定性的描述上，这是社会科学、人文科学中常用的方法。系统科学是要走“精密科学”之路的，那么出路在哪里？这个出路就是人-机结合以人为主的思维方式和研究方式。采用“机帮人、人帮机”的合作方式，机器能做的尽量由机器去完成，极大扩展人脑逻辑思维处理信息的能力。通过人-机结合以人为主，实现信息、知识和智慧的综合集成。这里包括了不同学科、不同领域的科学理论和经验知识、定性和定量知识、理性和感性知识，通过人-机交互、反复比较、逐次逼近，实现从定性到定量的认识，从而对经验性假设正确与否做出明确结论。无论是肯定还是否定了经验性假设，都是认识上的进步，然后再提出新的经验性假设，继续进行定量研究，这是一个循环往复、不断深化的研究过程。

综合集成方法的运用是专家体系的合作以及专家体系与机器体系合作的研究方式与工作方式。具体地说，是通过从定性综合集成到定性、定量相结合综合集成再到从定性到定量综合集成这样三个步骤来实现的。这个过程不是截然分开，而是循环往复、逐次逼近的。复杂系统与复杂巨系统（包括社会系统）问题，通常是非结构化问题。通过上述综合集成过程可以看出，在逐次逼近过程中，综合集成方法实际上是用结构化序列去逼近非结构化问题。图 1 是综合集成方法用于决策问题研究的示意图。

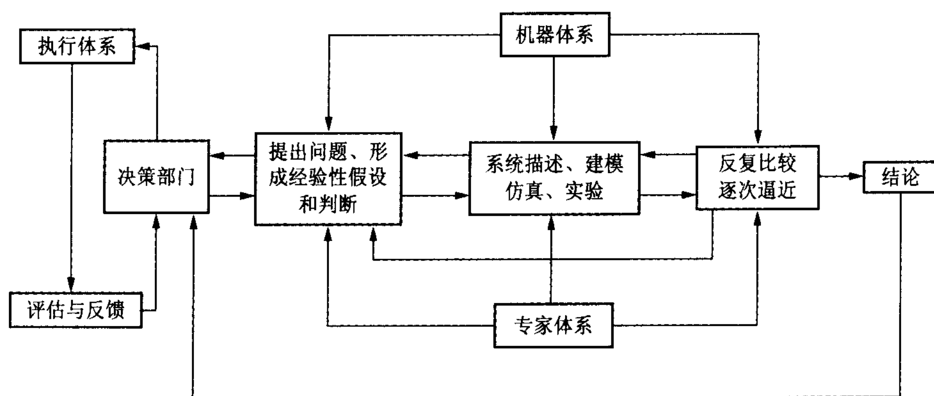


图 1

这套方法是目前处理开放的复杂巨系统（包括社会系统）的有效方法，已有成功的案例证明了它的有效性[7]。综合集成方法的理论基础是思维科学，方法基础是系统科学与数学科学，技术基础是以计算机为主的现代信息技术和网络技术，哲学基础是辩证唯物主义的实践论和认识论。

二、综合集成理论与综合集成技术

科学是认识世界的学问，技术是改造世界的学问，工程是改造世界的实践。从这样三个层次来看，现代科学技术已有了巨大发展，人类对客观世界的认识越来越深刻，改造客观世界的能力也越来越强。今天，科学技术对客观世界的研究与探索，已从渺观、微观、宏观、宇观直到胀观五个层次的时空范围[8]，可用图2来表示：

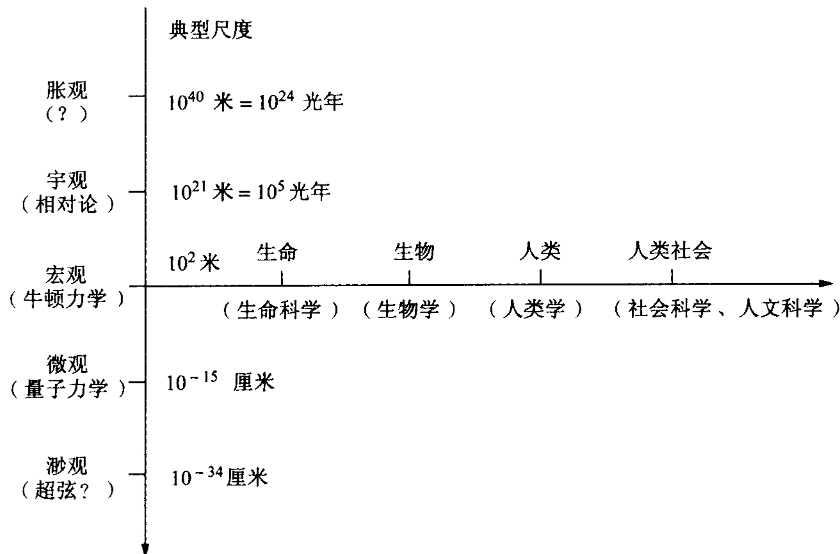


图2

其中宏观层次就是我们所在的地球，在地球上出现了生命、生物，产生了人类和人类社会。相应于这些不同部分和不同层次的研究，也就形成了今天众多的科学领域和学科。

钱学森从系统科学思想出发，从整体上建立了现代科学技术体系结构[9]，在这个体系中，不同领域、不同学科、不同层次的知识，相互关联、相互影响共居一体，而且这个体系是开放的，随着科学技术的发展，这个体系也要发展。

客观世界是相互联系、相互影响、相互作用的，因而反映客观世界不同部分不同层次规律的不同科学技术部门之间，如自然科学、社会科学和人文科学之间，也是相互联系、相互影响、相互作用的，我们不应把这些学问的内在联系人为地加以割裂，而应把它们有机联系起来去研究和解决问题。

正如前面所说，现代科学技术的发展呈现出既高度分化，又高度综合的两种明显趋势。在这后一发展趋势中，不仅有同一领域内不同学科的交叉、结合，特别是不

同领域之间，如自然科学、社会科学、人文科学之间的相互结合以至融合，这已成为现代科学技术发展的重要特点。在这一趋势中，先后涌现出系统科学、管理科学、软科学、非线性科学、复杂性科学等。在这个方向上的理论和应用研究，都应引起我们高度重视，这里有很大的创新空间。特别是这方面人才的培养，显得更加迫切。这类人才是具有跨学科、跨领域研究能力和创新能力的复合型人才。

对于这后一发展趋势，我们始终面临着如何把不同领域、不同学科以及不同层次的知识综合集成起来的问题，这样形成的知识，无论是科学理论还是应用技术，都将使我们对客观事物的认识更加深刻，改造客观世界的能力也就更强。复杂性研究和复杂科学的积极倡导者 Gell-mann，在他所著的《夸克与美洲豹》一书中，曾写道"研究已表明，物理学、生物学、行为科学，甚至艺术与人类学，都可以用一种新的途径把它们联系到一起，有些事实和想法初看起来彼此风马牛不相及，但新的方法却很容易使它们发生关联"[10]。Gell-mann 虽然没有说明这里所说的新途径、新方法是什么，但从他们后来关于复杂系统、复杂适应系统的研究来看，这个新途径和新方法就是系统途径和系统方法。

一般来说，复杂系统、复杂巨系统不仅有自然属性，还有社会属性和人文属性，这些属性寓于同一个系统之中。研究这个系统不仅需要自然科学，也需要社会科学、人文科学，系统本身就把这些学问联系起来了。这就需要把这些学问综合集成起来，才有可能全面、深刻地去认识系统。以管理科学为例，大家都认为管理科学是自然科学、社会科学、人文科学相互交叉、结合以至融合的研究领域。实际上，管理科学所面临的研究和应用对象都是系统，这些系统通常都是复杂巨系统，特别是社会系统中的问题。既有自然属性，又有社会属性和人文属性。在这种情况下，我们需要的是把自然科学、社会科学与人文科学综合集成起来研究系统的管理问题，而不是把它们分割开来仅从自然科学角度或仅从社会科学、人文科学角度去研究，然后再拼起来。这是两种不同的研究路线，也是两种不同的研究方法。前者需要综合集成方法，后者还是还原论方法，方法不同效果也就不会一样，在实践中已有大量事实说明了这一点。

在现代科学技术向综合性整体化方向发展过程中，综合集成方法可以发挥重要的基础作用。从方法论与方法的特点上来看，综合集成方法本质上就是用来处理跨学科、跨领域和跨层次问题研究的方法论和方法。运用综合集成方法所形成的理论就是综合集成的系统理论，钱学森提出的系统学，特别是复杂巨系统学，就是要建立这套理论。国外关于复杂性的研究，实际上也是属于系统理论范畴[11]。

综合性整体化的方向，不仅有科学层次上的理论问题，也有技术层次上的应用问题。在这方面，比较典型的是系统工程技术的出现与发展。系统工程是组织管理系统的技术，它根据系统总体目标的要求，从系统整体出发，运用综合集成方法把与系统有关的学科理论方法与技术综合集成起来，对系统结构、环境与功能进行总体

分析、总体论证、总体设计和总体协调，其中包括系统建模、仿真、分析、优化、设计与评估，以求得可行的、满意的或最好的系统方案并付诸实施。由于实际系统不同，将系统工程用到哪类系统上，还要用到与这个系统有关的科学理论方法与技术。例如，用到社会系统上，就需要社会科学与人文科学方面的知识。从这些特点来看，系统工程不同于其他技术，它是一类综合性的整体技术、一种综合集成的系统技术、一门整体优化的定量技术。它体现了从整体上研究和解决问题的技术方法。

系统工程的应用首先从工程系统开始的，用来组织管理工程系统的研究、规划、设计、制造、试验和使用。实践已证明了它的有效性，如航天系统工程。直接为这类工程系统工程提供理论方法的有运筹学、控制论、信息论等，当然还要用到自然科学技术有关的理论方法与技术。所以，对工程系统工程来说，综合集成也是其基本特点。

当我们把系统工程用来组织管理复杂巨系统（包括社会系统）时，处理工程系统的方法已不够用了，它难以用来处理复杂巨系统（包括社会系统）的组织管理问题。在这种情况下，系统工程也要发展。由于有了综合集成方法，系统工程便可以用来组织管理复杂巨系统和社会系统了，这样系统工程也就发展了，现已发展到复杂巨系统工程和社会系统工程阶段。

从综合集成的系统理论到综合集成的系统技术，中间也应有个过渡桥梁，它属于技术科学层次。有些学者曾提出把这门学问称作“集成学”。考虑到综合集成的内涵和外延比通常所说的集成要广泛而深刻，因而称作“综合集成学”可能更贴切一些。从这个角度来看，工程控制论就是针对工程系统控制的综合集成理论。

三、综合集成工程

把综合集成理论与技术用于改造客观世界的实践中，就是综合集成工程。

对任何一项具体实践或工程，都是一个具体的实际系统，是有人参与的实际系统。因此，社会实践是系统的实践，也是系统的工程。这样一来，有关实践的决策与组织管理等问题，也就成为系统的决策与组织管理问题，在这种情况下，系统的理论方法和技术应用到社会实践或工程中去，也就是很自然的事情了。

人们在遇到涉及的因素多而又难于处理的实践问题时，往往脱口而出：这是系统工程问题。这句话是正确的。其实这句话包含两层含义：一个含义是，这是系统的工程或系统的实践，另一个含义是，既然是系统的工程就应该用系统工程技术去处理。可惜的是，人们往往只注意到了前者，却忘记了要用系统工程去解决问题。

要把系统工程应用到实践中，就必须有个运用它的实体部门。以航天为例，航天系统中每种型号都是一个工程系统，对每种型号都有一个总体部，总体部就是运用系统工程的实体部门。总体部由熟悉这个工程系统的各方面专业人员组织，并由

知识面比较宽广的专家(称为总设计师)负责领导。根据系统总体目标要求,总体部设计的是系统总体方案,是实现整个系统的技术途径。总体部把系统作为它所从属的更大系统的组成部分进行研制,对它所有技术要求都首先从实现这个更大系统的技术协调来考虑;总体部又把系统作为若干分系统有机结合的整体来设计,对每个分系统的技术要求都首先从实现整个系统技术协调的角度来考虑,总体部对研制中分系统之间的矛盾,分系统与系统之间的矛盾,都首先从总体目标的需要来考虑。运用系统方法并综合运用有关学科的理论与方法,对型号系统结构、环境与功能进行总体分析、总体设计、总体协调,包括使用计算机和数学为工具的系统建模、仿真、分析、优化、试验与评估,以求得满意的和最好的系统方案,并把这样的总体方案提供给决策部门作为决策的科学依据。一旦为决策者所采纳,再由有关部门付诸实施。航天型号总体部在实践中已被证明是非常有效的,在我国航天事业发展中,发挥了重要作用。

这个总体部所处理的对象还是个工程系统。但在实践中,研制这些工程系统所要投入的人、财、物、信息等也构成一个系统,即研制系统。对这个系统的要求是以较低的成本、在较短的时间内研制出可靠的、高质量的型号系统,对这个研制系统不仅有如何合理和优化配置资源问题,还涉及到体制机制、发展战略、规划计划、政策措施以及决策与管理等问题,见图 3 和图 4。

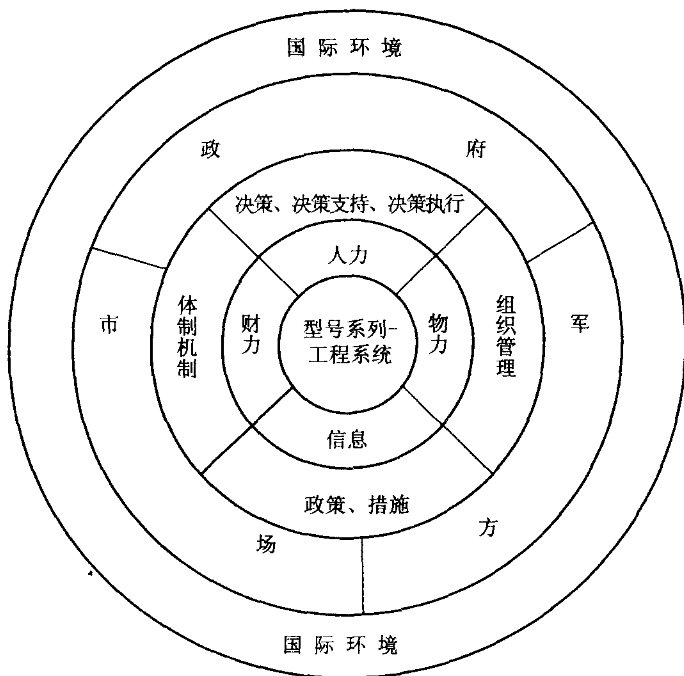


图 3

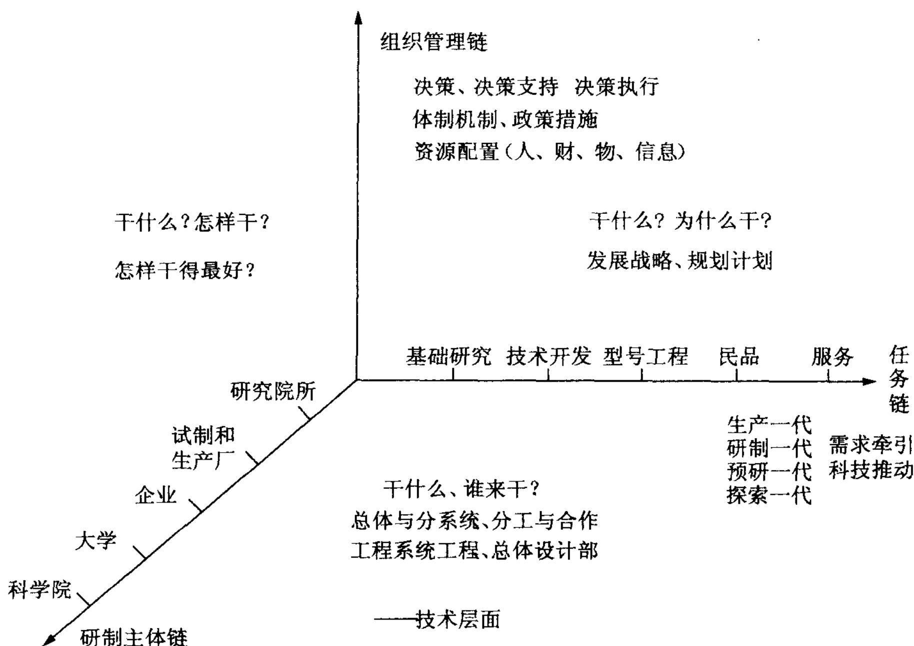


图 4

显然,这个系统要比工程系统复杂得多,属于社会系统范畴。如果说工程系统主要需要自然科学技术的话,那么这个研制系统除了自然科学技术外,还需要社会科学与人文科学。如何组织管理好这个系统,也需要系统工程,但工程系统工程是处理不了这类系统的组织管理问题,而需要的是社会系统工程。

应用社会系统工程也需要有个实体部门,这个部门就是钱老提出的运用综合集成方法的总体部,这个总体部与航天型号的总体部比较起来已有很大的不同,有了实质性的发展,但从整体上研究与解决问题的思想还是一致的。

综合以上所述,可以看出综合集成思想是钱学森系统科学思想的重要发展。综合集成思想在方法论层次上的体现就是综合集成方法。运用综合集成方法所形成的系统理论与系统技术,是综合集成思想在科学、技术层次上的体现。综合集成工程则是综合集成思想在实践层次上的体现,而综合集成思想在哲学层次上的体现就是大成智慧。这样,从综合集成思想、综合集成方法、综合集成理论、综合集成技术到综合集成工程,就构成了钱学森综合集成体系,这个体系必将对现代科学技术发展产生重大影响,特别是对科学技术向综合性整体化方向发展中,将发挥重要作用。这是钱学森对现代科学技术发展的重大贡献,是留给中国乃至整个人类的宝贵知识财富和精神财富。

从以上这些事实中,我们可以看出钱学森的系统科学思想,特别是综合集成思

想使他的知识结构不仅有学科和领域的深度，又有跨学科、跨领域的广度，还有跨层次的高度。而这个高度就不仅仅是科学知识范畴的问题，更反映出他的科学思想和科学智慧。从科学视野来看，如果把深度、广度和高度看作三维结构的话，那么钱学森就是一位既有科学深度又有广度还有高度的三维科学家，是一位名副其实的科学大师和科学帅才。

钱老在纪念和赞扬他的挚友著名力学家郭永怀时曾说"一方面是精深的理论，一方面是火热的斗争，是冷与热的结合，是理论与实践的结合，这里没有胆小鬼的藏身处，也没有自私者的活动地；这里需要的是真才实学和献身精神"[12]。这段话是怀念郭永怀先生时讲的，但也恰好反映了钱老本人的科学精神和高尚情操。

钱学森是一位具有坚定政治信仰与信念、高尚思想情操与品德和科学创新精神的科学家。几十年来，钱老始终关心的是中华民族振兴，献身的是祖国现代化事业，追求的是科学真理。他从一名爱国主义者成为一名共产主义战士。在革命和建设实践的洗礼中，不断净化自己的思想，不断升华和提高自己的人生观和世界观，甚至到了耄耋之年，也从未停止过前进的脚步。钱老曾说"我作为一名中国的科技工作者，活着的目的就是为人民服务"[13]。从人民视野来看，钱学森是一位人民科学家。

参考文献

[1] 钱学森：新技术革命与系统工程，《论系统工程（增订本）》，湖南科学技术出版社，1988年

[2] 钱学森：《创建系统学》，山西科学技术出版社，2001

[3] R. Gallagher , T. Appenzeller：超越还原论，《复杂性研究论文集》，戴汝为主编，1999

[4] 李政道：新世纪：微观与宏观的统一，《科学世界》，2000年第一期

[5] 钱学森：系统工程与系统科学的体系，《论系统工程》（增订本），湖南科学技术出版社，1988

[6] 钱学森：《人体科学与现代科学技术发展纵横观》，人民出版社，1996

[7] 于景元，涂元季：从定性到定量综合集成方法——案例研究，《系统工程理论与实践》，2002. No. 5

[8] 钱学森：基础科学研究应该接受马克思主义哲学指导，《哲学研究》，1989(1)

[9] 钱学森：现代科学技术的特点与体系结构，《论系统工程》，湖南科技出版社，1988

[10] 盖尔曼. M：《夸克与美洲豹——简单性和复杂性的奇遇》，湖南科技出版社，1998

[11] 欧阳莹之：《复杂系统理论基础》，上海科技教育出版社，2002

[12] 王寿云等：钱学森，《中国现代科学家传记》，科学出版社，1991

[13] 钱学森：感谢、怀念和心愿，《人民日报》，1991. 10. 19

从工程控制论到综合集成研讨厅体系

戴汝为

中科院自动化所复杂系统与智能科学实验室，北京，100080

《工程控制论(Engineering Cybernetics)》一书是钱学森先生于1954年在美国加州理工学院喷气推进中心任教时用英文发表的一部专著，这部专著被公认为是自动控制领域的经典著作之一，50余年来也是该领域中引用率最高的文献之一。

1990年钱学森先生发表了《一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论》[1]开创了我国科学家在系统科学和复杂性研究领域中的新领域，为十年后蓬勃发展的国际互联网和在中国大地上兴起的数字城市所证实。1992年他适时提出综合集成研讨厅的构思，至今经过我国两代科学家的努力，通过智能技术已经建成综合集成研讨厅体系。“我们比他们(司马贺先生和SFI的研究人员)高一个层次[2]”，从而走在了国际系统复杂性研究的前列。

一、奠定我国自动控制研究的基础

1955年钱学森先生冲破重重阻碍从美国返回祖国，回国后任刚建的中国科学院力学所所长及中国自动化学会理事长历时20年。他回国后就在中关村化学所礼堂讲授工程控制论，听众来自中科院的一些研究所、北大、清华等高校的教师与高年级学生约200余人。作者当时刚到力学所工作，有幸参加听课，并负责整理笔记分发给听课人员。在美国学习工作了20年的钱学森先生，刚回国就讲授工程控制论，给大家印象很深。他讲的是地道的普通话，既流畅又清晰，不用英文来讲述，这是花了很大工夫才做到的。记得他多次向所里一位副研究员询问所要用到的英文术语中的中文译名，如random这个字，他花了不少工夫琢磨汉语应如何翻译，在课堂上用了“随机”两字。他的讲课能够引人入胜，既有概括又有提高，不带书，粉笔字写得工整秀丽。北大的教师和同学反映，以前很少听过讲得这么好的课。

工程控制论是继美国科学家维纳于1948年发表的著名《控制论(关于在动物和机器中控制和通讯的科学)》一书后，以火箭为应用背景的自动控制方面的著作，书中充分体现并拓展了控制论的思想。据记载维纳曾经在1935年在清华数学系与电机系做过访问教授，所以后来有人认为控制论的思想可能是作者在中国清华大学时开始的。工程控制论是继控制论之后，对控制与制导方面进行创造性论述的专著，

中国科学家成为推动控制论科学思想的重要代表人物。当时苏联哲学界，由于工程控制论的问世，才从原来对控制论的批判转为后来加以赞扬，可见这种学术思想的效应是多么深远。这一事实于1960年在莫斯科举行的第一届国际自控联(IFAC)大会上对维纳的倍加赞扬而得到证实。

《工程控制论》(英文版)于1956年获中国科学院自然科学一等奖。1956年该书的俄文版问世，1957年德文版刊出，1958年中文版正式出版。它是由何善堉与戴汝为在整理1955年钱先生在力学所讲授工程控制论的笔记，参照英文原书，并吸收俄文版所添加的俄文文献整理而成。《工程控制论》中的一些内容被纳入专业教科书，成为自动控制领域的一本经典著作。

同时工程控制论的讲授和钱先生在科研及工程上的指导为我国培养了一代自动控制方面的专家。他们分别在各自的岗位上取得成就，有的长期从教、进而担任了大学校长，如西北工业大学原校长戴冠中教授、汕头大学原校长戴景成教授、国防科技大学原校长郭桂蓉教授都是受该书的影响转而从事自动控制研究的。可以说《工程控制论》及钱学森先生的教学和科研实践奠定了我国自动控制研究领域的基础。

二、前瞻性的学术思想

众所周知，《工程控制论》以学术思想的前瞻性而闻名于世，美国斯坦福大学的D．G．Luenberger教授及哈佛大学何毓琦(Y．C．Ho)教授等认为，工程控制论的学术思想在科学界超前5～10年，开辟了一系列控制方面的新方向。前苏联的伊万赫年科教授等则陆续发表了同名的专著，并明确地介绍这是中国钱学森教授开创的新领域。我国自动控制专家、已故的高为炳院士曾撰文论述过工程控制论是自动控制领域中引用率最高的著作。

直到近年来，2004年11月在清华大学举行的International Symposium on Intelligent and Networked Systems会上瑞典科学院院士、国际著名的自动控制专家Karl Astrom在他的报告中介绍了自动控制发展过程中的四部专著，一是詹姆斯．尼克斯与飞利浦斯合著的《伺服系统理论》(H．James, N．Nichols, R．Phillips. Theory of Servomechanisms)，二是维纳的《控制论》(N．Wiener, Cybernetics, on Control and Communication in the Animal and the Machine)，三是钱学森的《工程控制论》(H．S．Tsien, Engineering Cybernetics)，四是贝尔曼的《应用动态规划》(R．Bellman, Applied Dynamic Programming)。Astrom还向作者介绍了他当时就读于加州理工学院的情况，《工程控制论》于1954年出版前后，该校就开设工程控制论的课程，但当时不是钱先生自己讲，而是他让另外一位年轻的教授讲，他自己与学生坐在一起听，讲得不对或不恰当之处他站起来发言加以阐述，颇为生动有趣。

另外，Astrom 等于 2000 年编著的一本名为 Control of Complex system 一书中引用了《工程控制论》一书中的观点。

2000 年 7 月在美国马里兰大学举行了一个讨论控制领域现状及其未来的机会的讨论，由 Richard M．Murray 为首的一个五人专家小组提出“控制技术在信息丰富的世界中未来的发展方向”中，在有关机器人技术和智能机械方面有下面一段话：控制论工程的目标，在 20 世纪 40 年代甚至更早就已经被明确表达，就是使系统能展现出高度的灵活的展示或对变化的环境作出“智能”反应。在 1948 年，麻省理工学院的数学家 Norbert Wiener 给出了一个对控制论进行了广博的虽然是完全非数学的描述。钱学森通过与控制导弹有关的问题的驱动，于 1954 年提出了可作更多数学解释的工程控制论。这些工作及那时候其他的工作的聚合，形成了在机器人技术和控制的现代工作中大部分智力的基础。

科学的真知灼见表现在其对发展的前瞻性，50 年前问世的工程控制论一书中对这门新的科学的论述至今仍让人难以忘怀。该书的前言中有如下一段话：

这门新科学的一个非常突出的特点就是完全不考虑能量、热量和效率等因素，可是在其他各门自然科学中这些因素却是十分重要的。控制论所讨论的主要问题是一个系统的各个不同部分之间的相互作用的定性性质，以及整个系统的综合行为。

三、青出于蓝而胜于蓝

钱学森先生在美国东部的 MIT 取得硕士学位后，就到西部的加州理工学院师从应用力学大师冯·卡门，他在攻读博士学位期间已经取得了优异的成绩。当时在可压缩气体方面所提出的卡门-钱学森公式，后来成为空气动力学方面教科书中的内容而传之后世。1955 年钱学森冲破重重阻力准备返回中国大陆之前，曾经由夫人蒋英、儿子永刚和女儿永真陪伴，并且带着在加州理工学院的物理力学讲义和不久前出版的《Engineering Cybernetics》等材料和书籍向恩师告别。冯·卡门接过材料翻阅后，说了大意如下的一段话：“你在学术上的成就已经超过了我。因为有你这样一位学生我感到骄傲”。几十年后，当 1991 年钱学森先生获国家杰出贡献科学家奖时，有记者采访询问他获得大奖是否很激动？回答出人意料，他说并不激动。因为自己一生已经激动过三次了，第一次激动就是与导师告别时导师所说的上述一段话。当时自己感到在美国学习和工作了 20 年将回大陆为祖国人民服务，在学术上国际大师认为超过了自己，所以感到十分激动。实际的情况正是这样，在此之前在应用力学方面，冯·卡门已经把自己所承担的工作大都交给达到自己水平的钱学森了，而这位学生又在物理力学及工程控制论等方面，自己未进行过的研究工作领域做出了卓越的成绩，真是青出于蓝而胜于蓝了。

四、对系统科学三个层次的杰出贡献

钱学森先生于1955年返回祖国后，在我国的“两弹一星”及航天技术的发展方面所做出的贡献是家喻户晓的，不仅如此他还以学识的渊博受到大家的尊敬。他在20世纪中期有过一个预言：可以预料，从某种意义上说，本世纪末到下世纪初，将是一个学科交叉的时代。我们回顾钱学森先生近30年来的科学研究活动，可以看到他在系统科学、思维科学及复杂性科学等等方面都有开创性的及奠基性的工作。他所阐明的现代科学技术体系设想，更加体现了钱学森先生在众多领域中的博大精深。这里只略述在系统科学领域的贡献。

按照钱先生关于现代科学体系的观点，他认为自己对于工程控制论的工作是系统科学的技术科学层次，系统工程是工程应用层次，而开放的复杂巨系统理论则属于系统科学的基础科学层次，他给我们留下了珍贵的科学著作：

*《Engineering Cybernetics》 1954年
*“组织管理的技术——系统工程” 1978年
*《论系统工程》 1982年
*“一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论” 1990年
*《智慧的钥匙——钱学森论系统科学》 2005年

总之钱学森先生从工程控制论开始，进一步解决工程应用的问题，1990年提出开放复杂巨系统(OCGS)及处理这类系统的方法论，即以人为主人机结合，从定性到定量的综合集成法。这里，需要做一点解释：1990年提出综合集成法表达为“定性与定量相结合的综合集成法”，后经过讨论，改为“从定性到定量的综合集成法”。

钱学森先生在系统科学领域：以技术科学层次开创；在实践中不断的拓宽工程应用；在这种深厚的技术和工程背景下，发展到系统学的基础层次，从而对系统科学做出了全面的贡献。

当前，国内提出科学的发展观，在中华民族振兴屹立于世界的伟大进程中，我们面对着许多急需处理的与开放的复杂巨系统(OCGS)相联系的复杂问题，如社会经济发展，自然环境的生态保护问题，一些关键领域发展的决策以及构建和谐社会等重大问题。近年来大家开始了解到，Internet及其用户就是OCGS的典型。大家关注的数字城市，由大量城市楼宇住户及城市中的住户与居民，以及商务系统，政务系统等等组成的城市也就是一个OCGS，因而开放的复杂巨系统科学是21世纪的科学[3]。钱老在1991年发表的“再谈开放的复杂巨系统”一文中曾强调过他的看法：中国的社会主义建设必须考虑国际的影响，只有从一个一个具体的开放复杂巨系统入手进行研究，当这些具体的开放复杂巨系统的研究成果多了，才能从中提炼出一般的开放复杂巨系统理论，形成开放的复杂巨系统学，作为系统科学的一部分。上

世纪50年代形成工程控制论就是采用这个办法，是从一个一个自动控制技术中提炼出来的。在进行科学研究的过程中，从实际出发是个十分重要的问题，在开放的复杂巨系统及系统复杂性的研究中应以此为鉴。对开放的复杂巨系统而言，实践经验和资料累积最丰富的是社会系统和人体系统；前者是关系到国家事务的大问题，后者是涉及人民健康发展的大问题。这正是今天构建和谐社会当中的重要问题，而钱学森先生十几年前就提出了处理开放复杂巨系统的方法论，我们不禁更加为他的关心国家民族振兴并且为之无私奉献的精神所折服。

五、推动思维科学、系统科学的交叉发展

钱学森先生早在20世纪80年代就提出开展思维科学的研究；并提出思维科学研究的突破口在于“形象思维”的研究；他在1991年的“再谈开放的复杂巨系统”一文中，明确的论述了研究这类系统要有正确的指导思想；要用思维科学的成果；从定性到定量的综合集成技术，实际上是思维科学的一项应用技术；研究OCGS一定要靠这个技术。应用技术发展了，也会提炼，上升到思维学的理论，最后上升到思维学的哲学——认识论。在思维科学研究的策略上，再次表现出了钱学森先生依托技术背景重应用、讲效果，在不断实践中发展并上升到理论的科学务实作风。

1992年3月2日，钱先生给他当时的秘书王寿云的信中提出“从定性到定量的综合集成研讨厅”的构思，汇总了下列成功的经验。

(1) 几十年来世界学术讨论的Seminar；

(2) C^3I及作战模拟；

(3) 从定性到定量的综合集成法；

(4) 情报信息技术；

(5) “第五次产业革命”；

(6) 人工智能；

(7) “灵境”技术；

(8) 人-机结合的智能系统；

(9) 系统学；

(10) ……

在信中并认为，这又是一次飞跃。

在该信发出后，他于3月6日又给当时863计划智能计算机主题的负责人汪成为同志写信，谈到：最近我向王寿云同志提出一个新名词，叫“从定性到定量综合集成研讨厅体系”，是专家们用计算机(可能几十亿次/秒)和信息资料情报系统一起工作的“厅”。这个概念行不行请您们研究。一个星期后的3月13日，钱先生又给本文作者写信，信中谈到：最近我已告王寿云同志和汪成为同志。现在再向您说，我们

的目标是建成一个"从定性到定量的综合集成研讨厅体系"。这是把专家们和知识库信息系统、各种 AI 系统、几十亿次/秒的巨型计算机,像作战指挥演示厅那样组织起来,成为巨型人机结合智能系统。组织二字代表了逻辑、理性,而专家们和各种 AI 系统代表了非逻辑、非理性智能。所以这个厅是 21 世纪的民主集中制工作厅,是辩证思维的体现! 自本世纪初以来,发达国家中成功的科学研究中心,都有所谓 Seminar,我在 Caltech 就有幸参加过这种活动,印象很深,这真是民主集中! 在社会主义中国,我们应该把这个宝贵经验与毛泽东思想加现代科学技术结合起来,这就是厅。10 天之后钱老从思维科学的角度给作者写了另一封信,信中主要谈到:我想到一个问题:人的思维能力是不断发展的:1. 人类的历史含有此意;2. 一个人的思维能力也如此。那么它又是怎样发展的呢? 第一是人脑这个开放的复杂巨系统就有很强的可塑性,是活的不是死的、不变的;第二加实践的作用……而思维科学的任务就是从思维的角度找出思维能力发展的途径并付诸实施,当然这里首先要解决:什么叫思维能力? 也就是什么叫聪明、智慧? 我们要研究的从定性到定量的综合集成研讨厅体系就是完成思维科学这一任务的一个建议[4]。

这样,把思维科学的应用技术,综合集成法来处理系统科学的基础科学开放的复杂巨系统有关问题,推出它在应用层次的实践形式,从定性到定量的综合集成法研讨厅体系,这是钱学森先生在思维科学和系统科学交叉研究中的贡献,是自然科学和人文科学交融的体现。正如马克思所预言:"自然科学往后将会把关于人类的科学总括在自己下面,正如同关于人类的科学把自然科学总括在自己下面一样[5]"。

六、构建综合集成研讨厅体系

钱学森先生对构建综合集成研讨厅赋予了极大关注与多方面的指导,在 1992 年到 1999 年当中他在给作者的几十封信中多次提到综合集成研讨厅的关键和特点并对之进行了深刻的论述,例如谈到:辩证思维、社会思维、"泛化"的形象思维、研讨厅体系是同时结合形象思维和逻辑思维,因而是创造思维的好范例;人机结合的重要作用和深远意义;研讨厅体系就是知识发现技术等方面,从而形成了综合集成研讨厅的理论框架。

在国家自然科学基金委员会的大力支持与资助下,作者所在科研集体对 OCGS 和综合集成研讨厅进行了十多年的研究,经过智能系统的综合集成,知识工程的应用,人机结合理论的实践以及研讨厅的结构设计,信息技术软硬件的开发与具体构建等阶段。目前,已经研制成功了一个可用的研讨厅系统,已通过有关部门的验收,并多次在国内外进行演示,正在一些领域推广应用[6]。

作为思维科学(认知科学)的一项应用技术,与其他各种方法论不同的是,综合集成研讨厅体系不是一系列的公式的汇总,也不是以某几条公理为基础搭建起来的

抽象框架。其实质是指导人们在处理复杂问题时，把专家的智慧、计算机的智能和各种数据、信息有机的结合起来，把各种学科的科学理论和人的经验知识结合起来，构成一个统一的、人机结合的巨型智能系统和问题求解系统。这个方法论的成功应用在于发挥该系统的整体优势和综合优势。其核心在于人的心智与机器高性能的取长补短、综合集成。

其中对人的性智的利用，涉及到思维科学（认知科学）的研究，机器智能涉及到人工智能研究，两者之间的结合则有赖于人机交互技术。从这几种角度出发，通过长期研究，认为实现综合集成研讨厅体系，其实质就是针对与 OCGS 相关的某一类问题，构建一个以综合集成为基础的智能工程系统，作为可操作的工作平台。例如对于宏观经济决策支持问题，其解决途径就是建立一个包含宏观经济数据、知识、模型、建模方法的综合集成支持体系，作为操作平台。对于不同的复杂问题，则更换与问题有关的专家与数据、方法即可处理，使得该平台可以解决一些 OCGS 所派生出来的复杂问题。

从构建基于综合集成的智能工程系统，实现可操作的平台出发，研制重点在于1）充分利用信息技术（核心是网络技术和计算机技术）；2）从软硬件体系和组织结构上实现该系统，使之应用于复杂问题的研究实践。涉及到的关键问题包括：人机结合导致群体智慧的涌现；研讨组织方法研究和专家群体的有效交互规范；知识管理；系统开发方法；模型集成机制；人机交互方法；信息协作推荐技术等。

在综合集成研讨厅的概念中，“厅（Hall）”的含义在于：研讨厅是专家们同计算机和信息资料情报系统一起工作的“厅”，是把专家们和知识库、信息系统、人工智能系统、高速计算机等像作战指挥厅那样组织起来，形成巨型的人机结合的智能系统。其最初的构思类似综合了上述系统的会议厅。

随着 Internet 和网络的迅速普及，深入人们工作和生活的每一个层面，“Cyberspace（电子空间或数字空间）”成为一个重要的概念，它使参与者跨越时间和地域的限制，随时随地就所关心的问题进行研究、交流和探讨，并可随时利用网络上的大量资源，无论是本地的，还是远程的。信息技术的这个发展，为综合集成研讨厅的实现提供了一种新的、可能的形式，是对传统“厅”的一种扩展。因此，可建立基于 Cyberspace 的综合集成研讨厅，即 Cyberspace for Workshop of Metasynthetic Engineering。从 HWME 到 CWME 是信息社会条件下，对 HWME 的一种具体化，一方面意味着信息技术尤其是网络技术的飞速发展，为实现这一人机结合的巨型智能系统和工作空间提供了可能。另一方面，也说明，要建立实际可用的研讨厅系统，切实可行的方案是充分利用信息技术的成果，构建一个分布式系统。

钱学森先生预见到这种空间的扩展，他指出：“有关老词是 noosphere（思维圈），新词的 virtual reality 似宜仍用‘灵境’；而 Cyberspace 是人-机结合的思维思想活动世界，似可称为‘智慧大世界’，简称‘智界’[7]”。通过基于综合集成研讨厅体系的建

成，实现了钱学森先生的科学构思，从综合集成研讨厅体系广阔的应用前景中，我们更加体会到钱学森先生对我国系统科学、思维科学和系统复杂性研究领域的高瞻远瞩。学术思想极其富有前瞻性。

七、创新思维在碰撞中闪光

近年来，国际科学界“复杂性研究”崛起[8]，被称为是21世纪的重要科学领域之一。认知科学以其和人类自己发展的紧密联系以及与环境结合凸显出来的“现场”作用而昭示了日益重要的作用，因而成为当前的四大基础研究领域之一。因为钱学森先生提出：“复杂巨系统只能用‘从定性到定量的综合集成法’和‘综合集成研讨厅’加以处理解决”，所以我们比人工智能和认知科学大师司马贺和国际上复杂性研究领域享有“尼采的狂放世界”之称的SFI的研究人员高一个层次。这意味着在处理复杂巨系统相互问题的方法论和可操作性领域，我们走在国际前列。

钱学森先生在思维科学方面的许多精辟论述：例如人的思维能力提高，人-机的相互作用，从定性到定量综合集成法；对于认知科学和系统复杂性研究阐述了一些重要的观点等，这些对我们开展认知科学与思维科学结合进行研究会起到指导性的作用。同时，他为我们在研究方法和注重实践、体现可操作性方面树立了一个典范：“从科学史上看，大科学家变成大思想家的也不乏其例，但钱老与他们又有些不一样。他没有离开工程科学的本色，即他提出的思想很有操作性，他不光是提出一个思想原则就算了，而且有一整套操作的技术，从思想方法一直到最后技术上的实施，有一整套的方法[9]”。这值得我们认真学习。

现在看来，对上述问题在国内、外的学术界已有不少共识。但是回顾钱学森先生半个世纪以来在学术上的创新观点，从其提出到被学界所认识，再到通过工程实践加以实现，这个过程充满着发现、置疑、非议、探讨和认同，这也正是许多前瞻性的学术思想、观点在科学史上的共同经历。50年前《工程控制论》问世之初并未受到重视，15年前“开放的复杂巨系统及其方法论”发表时，也曾面临一度淡漠。但时间的烟尘并未掩盖思想创新的光芒，现在这些学术思想的前瞻性已为科技的发展和社会的进步得到证实。这次综合集成研讨厅体系的构建得以实现其中应该特别提及的是我国科技体制改革所建立的“香山科学会议”对创新思想的支持。“香山科学会议”以其前沿性、前瞻性和交叉性、综合性而著称，曾有人媲美美国的高登会议(Golden Research Conferences)。从1994年7月第20次会议对开放复杂巨系统方法论展开讨论，1997年1月第68次会议对其在理论与实践上的进展进行大视野、多角度、高层次的学科交叉和研究讨论，钱学森在会议的书面发言当中，从科学方法论的高度再次论证了开放的复杂巨系统及其方法论的有效性；1998年12月第110次会议上，以控制论与科学技术革命为题，阐述了控制论、工程控制论对科技进步的巨

大影响并缅怀了维纳和钱学森的杰出的科学贡献；紧接着，4个月之后的第112次会议以“复杂性科学”为主题，沟通各领域科学家对复杂性科学的认识，探讨我国复杂性科学研究的方向，对系统概念的重要以及开放的复杂巨系统的观点进行了深化的探讨[10]。历时6年，经过了对开放的复杂巨系统的具体研究和构建综合集成研讨厅的工程实践，在开发出可操作的平台的基础上，于2005年9月举行了262次“香山科学会议”，主要由军事系统工程科技人员参与，主题是“从定性到定量综合集成研讨厅的理论与实践”。会议对“从定性到定量综合集成方法”和研讨厅体系的重要方法论意义和实践价值进行了充分探讨和认识。认为现代军事系统是典型的开放复杂巨系统，运用“从定性到定量综合集成研讨厅体系”的理论和方法解决军事系统的科学决策问题，有着十分重要的现实意义[11]。这几次香山科学会议贯穿着对钱学森先生的开放复杂巨系统和综合集成研讨厅等学术观点的探讨与深化，在其实践和发展中发挥了重要作用。正如香山会议十年历程文集的标题所示：“创新思想在碰撞中闪光”。

最后，结束本文时，我不得不感谢钱学森先生从上世纪80年代近二十年来不断在信中，给作者指明研究方向，探讨学术问题，使作者深受教益。“尊其所闻，行其所知”，钱学森先生的科学思想将永远鼓舞着我们在实现中华民族伟大复兴的科学研究道路上不懈前进！

参考文献

[1] 钱学森、于景元、戴汝为：《自然杂志》，1990年13(2)

[2] 钱学森致戴汝为信件，1998年7月4日

[3] 戴汝为：“复杂巨系统科学——一门21世纪的科学”，《自然杂志》，1997年19(4)

[4] 钱学森致王寿云、汪成为、戴汝为信件，1992年3月2～23日，引自《开放的复杂巨系统》，浙江科学技术出版社，1996年

[5] 马克思：《经济学——哲学手稿》，人民出版社，1957年

[6] 戴汝为：“基于智能技术的综合集成研讨厅体系”，香山科学会议第262次学术讨论会中心议题报告，北京，2005年

[7] 钱学森致戴汝为信件，1995年2月2日

[8] 戴汝为、沙飞：“复杂性问题研究综述：概念及其研究方法”，《自然杂志》，1995年17(21)

[9]《文汇报》，2001年3月21日，11版

[10]《创新思想在碰撞中闪光》，中国环境科学出版社，2003年

[11] 香山科学会议简报，247期，2005年10月26日

钱学森系统科学思想与辩证思维

冯国瑞
北京大学哲学系，北京，100871

我国著名科学家钱学森院士在几十年的科学技术活动中，特别是在系统科学的理论研究和社会实践过程中，从自发到自觉、由初级到高级、从表浅到深层地应用并阐发了辩证思维方法，不仅在现代科学技术领域作出了巨大的创造性贡献，有效地推动了中国社会主义事业的顺利发展，而且在思维方式上给人们以深刻的智慧启迪。因此，研究钱学森系统科学思想与辩证思维，对于促进现代科学技术与社会主义和谐社会建设的发展，对于推动马克思主义哲学的前进都具有重要的理论意义和实践意义。

一、中介、交叉是构建现代科学技术体系的枢纽环节

中介不仅是客观世界普遍联系的过渡环节，而且是构建精神体系的枢纽结点。列宁当年就曾指出："一切 Vermittelt＝都是经过中介，连成一体，通过过渡而联系的。大到天——整个世界(过程)的有规律的联系。[1]"又说："仅仅'相互作用'＝空洞无物，需要有中介(联系)。[1]"他还认为："要真正地认识事物，就必须把握住、研究清楚它的一切方面、一切联系和'中介'。[2]"

钱学森院士构建技术科学和现代科学技术体系的过程，就从自发到自觉地符合于列宁的这些辩证思维的思想。

(一) 技术科学是现代科学技术体系的中介环节

钱学森早在上个世纪 40 年代，在美国工作期间，基于对马克思主义哲学的初步了解，更由于自身科学技术实践的切身体会，就提出了作为技术科学的"工程科学"。《钱学森手稿》第五部分"工程科学"中指出"1947 年夏，作者回国探亲，先后访问了浙江大学、交通大学和清华大学，以'工程和工程科学'为题。就工程科学的内涵和特点、研究内容和方法、当前的研究领域，特别是工程科学在中国发展的重要性等方面做了讲演。[3]"钱学森的长期挚友，著名科学家罗沛霖院士认为："《钱学森手稿》的第五部分是'工程科学'，指旨在基本科学与技术之间起桥梁作用的科学。这是在 20 世纪中期兴起来并起巨大作用的一个科学范畴……从《钱学森手稿》看，钱学森基于

他在飞行器方面的研究实践，早在20世纪40年代已经加以强调和倡导了。[4]”钱学森1955年回国以后，不久就将他在技术科学方面的思想作了一次回顾和总结，于1957年在《科学通报》上发表文章《论技术科学》。他指出：“技术科学。它是从自然科学和工程技术的互相结合所产生出来的，是为工程技术服务的一门学问。[5]”同时，他还认为：对“技术科学研究的成果再加以分析，再加以提高，就有可能成为自然科学的一部分。[5]”钱学森正是由于找到了基础科学与工程技术的交叉和中介，才提出了技术科学的概念。这不仅体现了科学与技术的交叉结合，由此构建了现代科学技术体系的一个中介环节，而且对人类认识现代科学技术体系是一个巨大的创造性的推动，对促进工程技术和现代科学技术的发展以及整个社会的进步产生了积极的影响。

（二）中介和交叉在构建现代科学技术体系中的关键作用

钱学森在运用系统科学的思想和方法构建现代科学技术体系的过程中，一方面，坚持深层次地应用辩证思维方式，一方面，又十分注意抓住各个层次的中介环节。

钱学森构建的现代科学技术体系或人类知识体系结构，是一种复杂的动态网络系统。这种体系结构从横向上分为十一个大的科学部门，每一个大的科学部门从纵向上又由应用技术、技术科学和基础科学三个层次构成。十一个大的科学部门通过十一座桥梁与马克思主义哲学相联结。同时，在前科学领域，既有实践领域知识库和哲学思维，也有人们的不成文的实践感受。这些领域的知识在一定的条件下，也都可以通过复杂的渠道和方式进入科学技术领域，而与现代科学技术体系一起成为丰富、深化、发展马克思主义哲学的知识原料和思想素材。

钱学森关于现代科学技术体系的思想，完全符合于马克思主义哲学的基本观点。马克思在《1844年经济学——哲学手稿》中指出：自然科学与社会科学必将交叉、结合，形成统一的整体科学体系。因为“历史本身是自然史的即自然界成为人这一过程的一个现实部分。自然科学往后将包括关于人的科学，正像关于人的科学包括自然科学一样：这将是一门科学。”[6]恩格斯认为：从19世纪中叶以来，由于科学发展的伟大进步，自然科学已经从经验自然科学上升到理论自然科学的新阶段。在这个新阶段里，更应当坚持主观辩证法是客观辩证法辩证反映的观点。因此，应当“意识到自然过程的辩证性质”，[7]“自然科学的系统化，除了在现象本身的联系中是找不出来的”，[7]从而“促使理论自然科学发生革命”。[7]恩格斯总结了科学发展的历史经验，研究了当时科学发展的现实状况，深刻地预见到科学发展将通过种种“接触点”的中介而走向整体化、系统化。他指出：“在分子科学和原子科学的接触点上，双方都宣称与己无关，但是恰恰就在这一点上可望取得最大的成果”。[7]正是由于这些“接触点”的中介，沟通了学科间的彼此联系，使现代科学出现了系统化、整体化的崭

新局面。而且，恩格斯对当时科学发展的现状，特别是对具有里程碑意义的科学成果（如能量守恒和转化定律的建立，细胞学说的诞生和进化论的创立）作了深层次的研究，指出："我们就能够依靠经验自然科学本身所提供的事实，以近乎系统的形式描绘出一幅自然界联系的清晰画面。[8]"列宁在1904年根据科学发展综合交叉的总体趋势，预言20世纪更将会出现"从自然科学奔向社会科学的大潮流。[9]"而且，列宁把科学发展放在真理是过程的认识辩证法的总的过程中加以考察，指出："科学是圆圈的圆圈[1]"。

由上述钱学森所构建的现代科学技术体系或人类知识体系结构可以看出，他的现代科学技术体系构建的基本思路符合于马克思主义哲学的相关思想。因为在这个现代科学技术体系中，在纵向、横向及前科学领域与现代科学技术之间，都存在着复杂的中介和交叉。正是由于这些中介和交叉，才构成了复杂的人类知识体系的动态网络结构。

二、辩证思维是构建现代科学技术体系的动态的方法

列宁认为："辩证法是活生生的、多方面的（方面的数目永远增加着的）认识，其中包含着无数的各式各样观察现实、接近现实的成分（包含着从每个成分发展成整体的哲学体系），——这就是它比起'形而上学的'唯物主义所具有的无比丰富的内容。[1]"他还指出："认识是思维对客体的永远的、无止境的接近[1]。""思维应当把握住运动着的全部'表象'，为此，思维就必须是辩证的。[1]"钱学森院士构建现代科学技术体系和提出开放的复杂巨系统理论的过程，就自觉地体现了列宁关于辩证思维的思想。

（一）现代科学技术体系的辩证性

如上所述，钱学森院士所构建的现代科学技术体系，不仅在其内部存在着复杂的辩证互动的种种关系，而且构建现代科学技术体系的过程本身就体现了这种动态发展的辩证性。钱学森院士从上个世纪70年代以来，最先提出现代科学技术体系有六大部门、七大部门，后来发展到八大部门、九大部门，80年代末提出了十大部门，90年代初提出了十一大部门。这个发展过程本身就体现了钱学森院士在构建现代科学技术体系过程中的思维的辩证性。不仅如此，而且他还自觉地运用辩证思维，认为这个现代科学技术体系是一种开放的、复杂的、动态的网络系统，它还会无限地发展、前进。钱学森院士指出："这个科学技术体系是个开放的系统，不断演化的，随着社会的进步，内容会发展变化，会有新的大部门出现。所以构筑现代科学技术体系是长期任务。[10]"他还认为："我构筑的这个现代科学技术体系，是在马克思主义哲学指导下的系统"[10]。"我认为今天科学技术不仅仅是自然科学工程技术，

而且是人类认识客观世界、改造客观世界的整个知识体系，而这个体系的最高概括是马克思主义哲学。我们完全可以建立起一个科学体系，而且运用这个科学体系去解决中国社会主义建设中的问题。……我在今后的余生中就想促进一下这件事情。[10]”事实证明，钱学森院士构建现代科学技术体系的内容、过程和思维方式，不仅符合于马克思主义哲学的基本观点，而且是对马克思主义哲学在当代社会实践和科学技术条件下的丰富、深化与发展。列宁曾经指出：“哲学的历史”，“简单地说，就是整个认识的历史。[10]”列宁当时列举了希腊哲学已经涉及到的各个知识部门，诸如：“各门科学的历史、儿童智力发展的历史、动物智力发展的历史、语言的历史，注意：＋心理学＋感觉器官的生理学[1]”。接着，列宁指出：“这些就是认识论和辩证法应当从中形成的知识领域。[1]”而且，应当注意吸收动态发展的“全部知识领域[1]”的成果。列宁还认为：从上述科学与哲学辩证互动的过程和关系来看，“要继承黑格尔和马克思的事业，就应当辩证地探求人类思想、科学和技术的历史[1]。因此，要发展马克思主义哲学，就应当总结和吸收“自然科学史和哲学史＋技术史的精华。[1]”

钱学森院士的上述思想，正体现了对科学史、技术史和哲学史的辩证探讨以及对这些领域的思想精华的综合吸收。不仅如此，而且钱学森院士对当今条件下现代科学技术与马克思主义哲学辩证互动关系的思想也作出了新的丰富、深化和发展。钱学森认为：一方面，现代科学技术应当以马克思主义哲学为指导，另一方面，现代科学技术又可以丰富、深化、发展马克思主义哲学。

关于前者，钱学森指出：马克思主义哲学“是对人类知识、理论的最高概括[11]”，同时，“马克思主义哲学也是人类一切实践经验的最高概括[12]”。因此，马克思主义哲学是人类认识的最高智慧，是人类知识体系中的最高层次。1987 年，钱学森在《智慧与马克思主义哲学》一文中，指出：“要有智慧就必须懂得并会用马克思主义哲学去观察客观世界的事物。这样我们就重新肯定了哲学的涵义：智慧的学问。但更明确了，必须是马克思主义哲学。[13]”他还指出：“发展交叉科学必须要用马克思主义哲学作指导。[14]”“如果能在交叉科学的研究中用好马克思主义哲学，那交叉科学在我国的发展，前途是光明的。这是必然的，无疑义的。[14]”既然马克思主义哲学是人类认识的最高智慧，是人类知识体系的最高层次，因此，“基础科学研究应该接受马克思主义哲学的指导[10]”。不仅如此，而且因为“马克思主义哲学既然是人类实践经验的最高概括，它就应该对自然科学、社会科学、技术科学、数学和工程技术的发展有指导作用。必须承认这个指导作用。[11]”而如果忽视和否定这种指导作用，那将是危险的。钱学森认为：“所有的科学技术工作，自然科学、社会科学、技术科学、数学、工程技术，不用马克思主义哲学指导，或者不重视马克思主义哲学对于科学研究的指导作用，是危险的。[11]”他还指出：“应用马克思主义哲学指导我们的工作，这在我国是得天独厚的。从我个人的经历中，我的确深有体会：马克思主义哲学确实是一件宝贝，是一件锐利的武器。我们在搞科学研究时（当然包括交叉学科），

如若丢弃这件宝贝不用,实在是太傻瓜了![14]"1992 年 9 月 17 日,钱学森院士在致笔者的信中,一方面,对我们组织现代科学与马克思主义认识论讨论班给予肯定,一方面,又指出:"有些搞自然科学工程技术的自以为'务实派',而不知他们正在脱离马克思主义哲学这个最大的'实',危险呵!"

关于后者,钱学森认为,在他的现代科学技术体系中,条条道路通向人类认识的最高智慧——马克思主义哲学,虽然这些道路有些是直接的,有些是曲折的。他指出:"马克思主义的哲学也就是人类社会实践的最概括的理论,随着人类的社会实践的不断发展,新事物的出现,当然要不断地充实、发展马克思主义的哲学。[11]"又说:"马克思主义哲学本身是要发展的,它要随着人类社会实践的积累而发展。发展了的自然科学、社会科学、数学、技术科学、工程技术、又影响马克思主义哲学的发展。[11]"为什么?因为现代科学技术体系和马克思主义哲学都是开放的复杂巨系统,它们在辩证互动的过程中交互作用,辩证发展,马克思主义哲学应当从自然科学、技术科学、社会科学、交叉科学和相关的人文科学等等的前沿成果中汲取营养,经过提炼和升华,成为丰富、深化、发展自己的思想素材和方法原料。

钱学森不仅从总体上论述了现代科学技术可以丰富、深化、发展马克思主义哲学,而且从分体上诸如开放的复杂巨系统理论、从定性到定量综合集成法与研讨厅体系以及思维科学等方面阐明了对马克思主义哲学的丰富、深化、发展具有重要作用。关于开放的复杂巨系统理论和从定性到定量综合集成法与研讨厅体系的这种作用,我们将在下面另行展开,关于思维科学与马克思主义哲学的辩证关系,钱学森指出:"思维科学,把认识论作为桥梁,也还是马克思主义哲学的结构的一个组成部分。[15]""思维学作为思维科学的基础科学之上,上升到一切人类知识最高概括的马克思主义哲学要通过一座桥梁,即认识论。[15]"同时,钱学森对思维科学的概念定义、学科定位、基本内容、主要任务和运行机制等都作了前瞻性的宏观构想[16]。

(二)开放的复杂巨系统理论的辩证性

钱学森院士于 20 世纪 80 年代末叶提出的开放的复杂巨系统理论以及从定性到定量综合集成方法论,是他一生中第三次科学创造高峰的精华部分,在国内独领风骚,在国际上屹立群伦。这种理论和方法论,不仅在国内外的系统科学研究中独树一帜,引领潮流,而且在科学史、认识史上也作出了杰出的贡献。这种理论和方法论,是人类智慧的新成果,世界物质统一性的新揭示,方法论上的新桥梁,认识论上的新综合。

然而,钱学森院士坚持辩证思维,清醒地意识到了这种理论和方法论并没有穷尽认识,只是认识过程中的一种相对结晶,仍需要继续发展和不断完善,而不能把它们绝对化、凝固化。钱学森指出:"关于开放的复杂巨系统,由于其开放性和复杂性,我们不能用还原论的办法来处理它,不能像经典统计物理以及由此派生的处理简单

巨系统的方法来处理,我们必须用依靠宏观观察,只求解决一定时期的发展变化的方法。[10]”由于开放的复杂巨系统是动态演化的过程,“所以任何一次解答都不可能是一劳永逸的,它只能管一定的时期,过一段时间,宏观情况变了,巨系统成员本身也会有其变化,具体的计算参量及其相互关系都会有变化。因此对开放的复杂巨系统,只能作比较短期的预测计算,过了一定时期,要根据新的宏观观察,对方法作新的调整。[10]”钱学森院士的这种看法,是他坚持实事求是、辩证思维的科学态度、科学精神和科学方法的重要体现。他认为:“这样说来,开放的复杂巨系统理论及方法有其局限性,但这种认识是实事求是的,这种理论和方法也是有效的,因为它比那些脱离现实的所谓‘理论’更合乎实际。[10]”他还指出:“处理开放的复杂巨系统,目前还没有从微观到宏观的严格理论,如果到21世纪能出现这样的理论,那将是科学技术的又一次飞跃![10]”

三、辩证思维与科学方法论

钱学森院士在提出开放的复杂巨系统理论的同时,提出了处理开放的复杂巨系统的一系列的科学方法与科学方法论,这主要是从定性到定量综合集成法、从定性到定量综合集成研讨厅体系和总体设计部方法。

(一)从定性到定量综合集成法的辩证性

钱学森院士在论述从定性到定量综合集成法是一个辩证发展的过程时,指出:“我们的看法是辩证的,从定性到定量,定量又上升到更高层次的定性……‘定性定量相结合的综合集成法’,简称叫‘综合集成’,翻译成英文倒是可以借用他们那个词Meta-synthesis,是高层次的综合。[10]”1989年9月8日,钱学森在与中国科协“中国交通运输发展战略与政策研究”课题组的同志们座谈时,以“高层次咨询论证要用有中国特色的系统工程方法”为题发表讲话,指出:“这里讲的系统工程方法是从定性到定量综合集成……方法,就是让专家们充分地发表不同的建议与意见,吸收过来,然后在众多专家建议和思路的基础上,综合起来,以专家的智慧建立上百个、几百个参数的模型,再进行运算……采用这种系统工程的研究方法,对诸如社会主义建设中的大问题作为一个开放的复杂巨系统进行研究,得出的结论才能令人信服。这种研究方法,就是从定性到定量综合集成法。[10]”

钱学森院士对从定性到定量综合集成法是辩证思维的体现,有着自觉的、深刻的认识。他认为:“我看从定性到定量综合集成法,实质上体现了辩证思维,是用知识工程及信息技术来完成陈云同志提出的‘不唯上、不唯书、只唯实,交换、比较、反复’。[10]”他还指出:“我们一批搞系统学的同道称为从定性到定量综合集成法(以前称定性与定量相结合综合集成法),用来处理开放的复杂巨系统时的思维过程。定

性就是点点滴滴、不全面的感性认识;定量就是全面的、深化了的理性认识。这一转变是一个飞跃,所以是辩证思维。[10]”“辩证思维是什么?它是人们从事将感性认识上升到理性认识的思维过程。[10]”“所以辩证思维是高层次的,是思维科学中的一大难题。[10]”

辩证思维的重要内容就是要把握客观世界、社会实践和认识过程中的矛盾运动。就从定性到定量综合集成法来说,辩证思维就是要把握和处置认识过程中的矛盾运动。钱学森认为,“我们的从定性到定量综合集成法是建筑在《实践论》的基础上的,现在要说:从定性到定量综合集成法的工作过程是以《矛盾论》为指导思想的。[10]”为什么?因为“在建立数学模型的曲折过程中,要发现主要矛盾及矛盾的主要方面,而且要千万记住:矛盾是一个发展运动,会转化的。[10]”“我们的中心观点是事物的矛盾及矛盾的不断发展变化。”[10]

(二)从定性到定量综合集成研讨厅体系是辩证思维的体现

1992年3月2日,在给王寿云同志的信中,钱学森指出:“你们几位正在写作的文章可否以此为题:《从定性到定量综合集成研讨厅体系》?这是把下列成功经验汇总了:

(1)几十年来世界学术讨论的Seminar;

(2)C^3I及作战模型;

(3)从定性到定量综合集成法;

(4)情报信息技术;

(5)第五次产业革命;

(6)人工智能;

(7)“灵境”技术;

(8)人-机结合智能系统;

(9)系统学;

(10)……

这是又一次飞跃![10]”

此后第四天(3月6日),在给汪成为同志的信中,钱学森说:“最近我向王寿云同志提出一个新名词,叫‘从定性到定量综合集成研讨厅体系’,是专家们同计算机(可能要几十亿Flop)和信息资料情报系统统一起[(来)——引者所加]工作的‘厅’。[10]”

接着第七天(3月13日),钱学森在给戴汝为院士的信中,指出:“我们的目标是建成一个‘从定性到定量综合集成研讨厅体系’。这是把专家们和知识库信息系统、各AI系统、几十亿次/秒的巨型计算机,像作战指挥演示厅那样组织起来,成为巨型人-机结合的智能系统。[10]”“在社会主义中国,我们应该把这个宝贵经验(指semi-

nar——引者注)与马克思列宁主义毛泽东思想结合起来,这就是厅。[16]”

钱学森院士自觉地认识到从定性到定量综合集成研讨厅体系是辩证思维的体现。他指出:“这个厅是21世纪的民主集中制工作厅,是辩证思维的体现![16]”为什么?因为这种研讨厅体系,是按分布网络和层次结构来建设的动态机制,是一种具有纵深层次、横向发布、交互作用的矩阵式的研讨厅体系。这种系统通过人-机交互,反复对比,逐次逼近,实现从感性认识到理性认识、由定性到定量的转化,通过定量认识达到新的更高层次的定性认识,从而对于经验性的假设的正确与否作出明确的结论。这样的结论就是当下阶段对客观事物和实践过程的认识的科学结论。同时,这个系统和机制使参加研讨的集体在讨论问题的过程中,能够互相启发,彼此激励,使集体创见远胜于一个人的智慧。而且,这种研讨厅体系还可以把当今世界千百万人的聪明才智和古代人的智慧综合集成起来,得出较为完备的科学认识和理论结论。正因为如此,从定性到定量综合集成研讨厅体系作为一种综合集成技术,应当运用辩证思维去处理认识过程中的矛盾运动。所以,钱学森指出:“我想这部分思维方法就是《矛盾论》,因此要完善从定性到定量综合集成技术要引用《矛盾论》。[10]”

钱学森院士对这种研讨厅体系的运行机制和思维的辩证性及其认识作用给予了很高的评价。他指出:“这个研讨厅体系的构思是把人集成于系统之中,采取人-机结合,以人为主的技术路线,充分发挥人的作用,使研讨的集体在讨论问题时互相启发、互相激活,使集体创见远远胜于一个人的智慧。通过研讨厅体系还可把今天世界上千百万人的聪明智慧和古人的智慧(通过书本的记载,以知识工程中的专家系统表现出来)统统综合集成起来,以得出完备的思想和结论。这个研讨厅体系不仅具有知识采集、存储、传递、共享、调用、分析和综合等功能,更重要的是具有产生新知识的功能,是知识的生产系统,也是人-机结合精神生产力的一种形式。[10]”

(三)总体设计部方法与辩证思维

总体设计部是运用从定性到定量综合集成法和从定性到定量综合集成研讨厅体系,从总体上为决策者和决策部门提供咨询服务的专家群体。钱学森认为:“总体设计部由多部门、多学科的专家组成,在以计算机、网络和通信为核心的高新技术支持下,对社会主义现代化建设的各种问题,进行总体分析、总体论证、总体设计、总体规划、总体协调,提出具有可行性和可操作性的配套的解决方案,为决策者和决策部门提供科学的决策支持。[10]”总体设计部的思想和方法是钱学森在总结国防科技实践经验的基础上提出来的。他指出:“总体设计部设计的是系统的‘总体’,是系统的‘总体方案’,是实现整个系统的‘技术途径’。[17]”他还认为:“总体设计部的实践,体现了一种科学方法,这种方法就是‘系统工程’。……我国国防尖端技术的实践,已经证明了这一方法的科学性。[17]”后来,钱学森把这种总体设计部门方法推广开来,

应用到整个国家的社会主义现代化建设这项特大的、复杂的、动态的社会系统工程中来，他指出："要研究大战略，整体的战略……研究整个国家这么错综复杂的关系。"[18]"现在提出的整个国家的问题，那就是需要这样一个'总体设计部'，需要各方面的专家参加。[18]"

钱学森对总体设计部的来源、功能、特点、性质作了深刻的分析，认为这种方法既是辩证思维的体现，因为是总结了实践与认识矛盾运动的新鲜经验，又是中国人的独创，资本主义国家是提不出来的。他指出："我们对系统总体设计部的认识源于导弹总体设计部的实践，而那时领导我们工作的是周恩来总理和聂荣臻元帅，他们都强调中国共产党在领导革命过程中的斗争经验，包括大规模集团军的战斗经验，如周总理就提出'三高'（高度的政治思想性、高度的科学计划性、高度的组织纪律性）。所以我们的总体设计部是社会主义思想指导下的总体设计部。它实施党的民主集中制。它是我们的特点，也是优越性所在。

有了这样的中国导弹卫星总体设计部的实践经验，才使我们可能提出社会系统总体设计部体系。这是中国的，资本主义国家是学不了的！

所以总体设计部问题是中国社会主义建设的大课题，不是可有可无的小事！[10]"

他还认为："我们这里讲的社会主义建设总体设计部是以马克思列宁主义、毛泽东思想为指导的，对党和国家负责的，绝不是资本主义国家所谓的思想库，那是为垄断资本家服务的。[10]"

运用辩证思维，可以把系统科学、系统工程、从定性到定量综合集成法、从定性到定量综合集成研讨厅体系和总体设计部方法构建成为一种彼此贯通、相互联系的网络系统，对社会实践和认识过程具有重要的理论意义与实践价值。钱学森指出："系统科学、系统工程和总体设计部，综合集成和研讨厅体系紧密结合，形成了从科学、技术、实践三个层次相互联系的研究和解决社会系统复杂性问题的方法论，它为管理现代化社会和国家，提供了科学的组织管理方法和技术，其结果将使决策科学化、民主化、程序化以及管理现代化进入一个新阶段。[10]"

四、辩证思维，综合创新

钱学森从一位爱国知识分子成长为坚定的共产主义者，他在长期的社会实践和科研工作中，从自发到自觉地应用辩证思维方法，指导自己的科学研究和社会实践，取得了举世瞩目的卓越成就。

从他几十年的实践经验来看，特别是他对系统科学的研究，尤其是创立开放的复杂巨系统理论和从定性到定量综合集成方法论的过程来看，他的思想深处的一个最可宝贵的精华是他坚持辩证思维，综合创新。

（一）科学贡献的思维根据

钱学森三次科学创造高峰的重要根据之一，就是努力坚持辩证思维，综合创新，第一次是在美国学习、工作的二十年。1955 年夏天，当他告别恩师冯·卡门(T. v. Karman)教授准备回国时，这位世界著名的力学大师高兴地对钱学森说："你现在在学术上已经超过了我"。钱学森后来回忆当时的心情："我一听他这句话，激动极了，心想，我 20 年奋斗的目标，现在终于实现了，我钱学森在学术上超过了这么一位世界闻名的大权威，为中国人争了气，我激动极了。这是我有生以来第一次这么激动。[10]"钱学森的第二次科学创造高峰是他对"两弹一星"的杰出贡献。"两弹一星"所用的理论和技术是博取国外之长而来的，但要结合中国的国情，创造出自己的特色之路，总结出成功的实践经验而使之科学化、理论化，这是运用辩证思维所取得的综合创新的成果。第三次科学创造高峰是他对系统科学研究的重大贡献，特别是提出了开放的复杂巨系统理论和从定性到定量综合集成方法论。对此，钱学森是高兴极了，因为又一次为中国人争了光。他说："我们提出了开放的复杂巨系统的概念和解决问题的方法：从定性到定量综合集成法，引用信息技术、知识工程。所以我们走在全世界的前头了。[10]"他还指出："这个方法也是中国的，是中国人的方法。一提到这一点我也感到很兴奋，因为这是我们社会主义中国的一个创新。[10]"他同时认为："这个方法是马克思主义的……这个方法是社会主义的……这个方法也是中国的[10]"。

（二）科学实践的理论思考

钱学森作为战略科学家，他的可贵之处就在于不断地对科学实践进行理论总结，对科学前沿问题进行理论探索。而这种理论总结和理论探索的内在核心就是辩证思维，综合创新。前面谈到的他对领导"两弹一星"科学实践基本经验的理论总结，不仅形成了他关于系统工程和总体设计部的思想和方法，而且对于他后来集中开展的系统科学的研究也奠定了重要的思想基础。同时，更为难能可贵的是，他将对社会主义祖国的深挚热爱和对人民事业的无限忠诚凝聚到科学前沿的深入探索之中。他的第一次科学创造高峰所体现的科学探索精神，使他超过了世界力学权威冯·卡门教授，为中国人争了光。他的第二次科学创造高峰，即在"两弹一星"的伟大事业中，更蕴涵着他的科学探索精神。他的第三次科学创造高峰，即在系统科学的研究中，更加突出地反映了他的科学探索精神。他的理论总结和科学探索，都贯穿着辩证综合和理论思维。这种理论思考的内在核心就是辩证思维。正因为他运用辩证思维，所以他才能够对科学实践作出理论的总结，提炼出科学的思想和科学的方法，才能够对科学前沿领域不断地进行科学探索，并且作出了光辉的科学贡献。而这种理论总结和科学探索所内蕴的辩证思维，又能够在更高层次上反映他的智慧

发展之路和智慧凝结之果。

（三）启迪智慧的崭新篇章

钱学森的科学实践和理论思考，闪耀着夺目的智慧之光，而且，他自己就高瞻远瞩地提出了大成智慧工程和大成智慧学。今天，我们学习钱学森的科学贡献、科学思想和科学精神，就更应当接受他的智慧的启迪，把这种智慧的启迪用于今天建设社会主义的伟大事业中来。

在21世纪，我们要全面建设小康社会，构建社会主义和谐社会，开创中国特色社会主义事业的新局面，实现中华民族的伟大复兴，创建有中国特色的社会主义文化（广义的），就应当坚持以马克思主义哲学为指导，继承、提升中国传统文化的精华，借鉴、吸收世界文明的优秀成果，认真总结当代社会实践的新鲜经验，综合吸收现代科学技术的前沿成果，坚持辩证思维，走综合创新的道路，谱写出中国社会主义文化的光辉篇章。

庆祝或纪念伟人的最重要的方法，莫过于继承和发扬他们的思想和事业。在庆祝钱学森院士95华诞之际，让我们学习他的科学思想并继承他的科学事业，作出无愧于伟大时代的应有贡献。

参考文献

[1]《列宁全集》第55卷，北京，人民出版社，1990年

[2]《列宁选集》第4卷，北京，人民出版社，1995年

[3]《钱学森手稿》，太原，山西教育出版社，2000年

[4] 宋健主编：《钱学森科学贡献暨学术思想研讨会论文集》，北京，中国科学技术出版社，2001年

[5]《钱学森论技术科学》，北京，《科学通报》，1957(2)

[6]《马克思恩格斯全集》第42卷，北京，人民出版社，1979年

[7]《马克思恩格斯全集》第20卷，北京，人民出版社，1971年

[8]《马克思恩格斯选集》第4卷，北京，人民出版社，1995年

[9]《列宁全集》第25卷，北京，人民出版社，1988年

[10] 钱学森著：《创建系统学》，太原，山西科学技术出版社

[11] 钱学森讲　吴义生编：《社会主义现代化建设的科学和系统工程》，北京中共中央党校出版社，1987年

[12] 钱学森1994年春致钱学敏的信

[13] 钱学森：《智慧与马克思主义哲学》《哲学研究》，1987(2)

[14] 中国科学技术培训中心编，《通接交叉科学的时代》，北京，光明日报出版社，1986年

[15] 钱学森主编：《关于思维科学》，上海，上海人民出版社，1986年

[16] 参见王寿云等:《开放的复杂巨系统》,杭州,浙江科学技术出版社,1996 年;
赵光武主编:《思维科学研究》,北京,中国人民大学出版社,1999 年
[17] 钱学森,王寿云,许国志:《组织管理的技术——系统工程》,文汇报 1978.09.27
[18] 中共中央组织部等:《迎接新的技术革命(上)》,长沙,湖南科学技术出版社,1984 年

综合集成法——整体论与还原论的辩证统一

卢明森

北京联合大学应用文理学院,北京,100083

关于整体论与还原论的探讨,是从19世纪末、20世纪初首先从科学哲学领域开始的,20世纪20年代有的哲学家从本体论角度进行了探讨;30年代以后一些科学家从系统科学的角度进行研究,60～70年代进一步取得重要成果;80年代以来的20多年,随着复杂性科学的兴起逐渐掀起高潮。讨论中涉及哲学本体论、认识论、科学哲学、科学方法论、思维方式、系统科学以及一些其他具体科学,还牵涉到未来科学与社会发展等问题。我们这里只从思维方式、方法论、系统科学的角度作些探讨。

整体论与还原论的比较研究,是思维方式、方法论、系统科学探讨中的一个重要问题。近20多年来,很多专家、学者结合"李约瑟问题"、中国传统文化对未来科学发展的作用等进行了广泛的讨论,各种见解之间虽然分歧很大,但在其发展趋势的认识上还是比较一致的,那就是对整体论与还原论的优势互补、辩证统一寄托很大的期望;只是对其具体实现形式很少有人能够说清楚。目前,只有钱学森院士提出的处理开放的复杂巨系统的方法论——从定性到定量综合集成法,才是实现整体论与还原论优势互补、辩证统一比较现实、有效的方法论,并将对未来科学技术与社会发展产生重要影响。

一、整体论与还原论及其各自的优势

(一)整体论与还原论的基本含义

作为思维方式、方法论的整体论是把宇宙间的一切事物,包括自然界、人与社会,都当作一个相互联系的统一整体看,只有从宏观、整体的角度来考察、认识,才能把握它的本质;一旦把事物与其周围环境之间的联系割断,一旦把构成事物各个部分、成分之间的联系割断,那么属于整体的属性也就丧失。其哲学基础是"天人合一",用的基本思维形态是形象思维,主要是凭经验、类比、模拟、比喻、综合,通过联想、想象、直觉、灵感或顿悟做出判断,因此,得到的结论虽然不是很准确,具有一定程度的模糊性、不确定性,却比较接近事物的本来面目。在东方,这是中国传统思维方式的核心,有着2000多年的历史,取得了辉煌的成就。在西方,文艺复兴以前也

占据重要地位，只是没有像中国那样得到比较充分的发展，随着近代科学技术的产生，逐渐被还原论淹没。

“还原论是把物质的高级运动形式（如生命运动）归结为低级运动形式（如机械运动），用低级运动形式的规律代替高级运动形式的规律的方法。还原论认为，各种现象都可被还原成一组基本的要素，各基本要素彼此独立，不因外在因素而改变其本质。通过对这些基本要素的研究，可推知整体现象的本质。”[1]还原论是西方近代思维方式、方法论的核心，其哲学基础是主客二分，用的基本思维形态是抽象思维，主要思维活动是分析，通过实验获取证据，运用归纳法得出一般结论，运用演绎法进行推演，建立理论体系，再用实验检验；形式逻辑是严密推演的工具，公理系统是追求的理想目标或范式，数学是精确分析的工具。近代科学的产生、发展与巨大成功主要靠还原论，因此使西方人对它推崇备至，上升成为基本的世界观、方法论。恩格斯明确地指出：“把自然界分解为各个部分，把各种自然过程和自然对象分成一定的门类。对有机体的内部按其多种多样的解剖形态进行研究，这是最近 400 年来在认识自然界方面获得巨大进展的基本条件。但是，这种做法也给我们留下了一种习惯：把自然界中的各种事物和各种过程对立起来，撇开宏大的总的联系去进行考察，因此，就不是从运动的状态，而是从静止的状态去考察，不是把它们看作本质上变化的东西，而是看作永恒不变的东西，不是从活的状态，而是从死的状态去考察。这种考察方法被培根和洛克从自然科学中移植到哲学中以后，就造成了近几个世纪所特有的局限性，即形而上学的思维方式。”[2]

（二）整体论与还原论的各自优势

整体论与还原论各有特点与优势。

整体论的主要特点与优势是：

（1）整体有两个非常重要的特点：第一，整体具有各个部分所没有的属性，这是各个部分相互作用、结合成为一个整体后所涌现出来的新属性，只为整体所具有，只能从整体的角度进行考察和研究，一旦把整体分解成为部分、成分或因素，这种属性就消失了，因此，难以从部分、成分或因素的角度去考察与研究；第二，整体是活的有机体，其任何部分只有同其他部分相互联系、相互制约、协调统一时才能作为这个有机体的一部分而存在，一旦解剖、分解成为部分，同其他部分与整体失去联系、制约、协调、统一，就不再是活的了。中医的最大优势是把人看成是一个完整的整体，从调理人的整体机能入手看待、医治疾病。北京宣武医院的凌锋教授把香港记者刘海若从死神那里抢救回来，主要指导思想就是整体理念，并在此基础上提出了“整体自洽理论”。整体论把客观事物视为完整的有机整体，整体性、系统性、综合性是其认识客观世界的优势所在。

（2）整体论认为，任何事物都不是孤立存在的，都与周围其他事物有着千丝万

缕的联系，它与周围其他事物形成一个复杂完整的系统（网络），它只是这个复杂完整的系统（网络）中一个不可缺少的环节，一旦脱离了这个复杂完整的系统（网络），不仅破坏了这个复杂完整的系统（网络），而且它自己也就失去了本来面目。中国传统思维方式中的“天人合一”观念，强调人与环境和谐相处、适应自然，就是这种整体观的具体体现。

（3）整体论所用的思维形态主要是形象思维，强调从宏观、整体上以经验为基础的体验、顿悟、直觉，而不是逻辑分析与推演；因为整体所具有的那些属性到底是怎么涌现出来的，不是逻辑分析与推演能解决得了的，只能凭借形象思维从宏观、整体的角度，以经验为基础，运用体验、感悟、直觉、灵感来认识，靠模拟、类比、比喻来说明。虽然这样的认识、说明往往具有一定程度的模糊性，却对解决现实存在的复杂性问题比较切实有效。

（4）整体论所得的结论，一般情况下多属于定性结论，具有模糊性，不是定量结果，不具有精确性。原因很简单，就是因为许多事物、问题难以量化，甚至根本不能定量化。例如，生命现象中的许多问题，人的精神、心理现象，伦理、道德问题，文学艺术问题，以及许多社会现象，起码在目前以及今后相当长一段时间内，都是难以或无法量化的，对于这样的问题只能进行定性分析，难以或不能进行定量分析。面对大量难以或无法定量化的复杂现象，还原论处于基本上束手无策的状态，才在近 20 多年来兴起复杂性科学研究，运用整体论来解决这些难题。

还原论的优势在近现代科学技术的发展中表现得相当充分，哲学、逻辑学、心理学、科学方法论、科学哲学等学科分别从不同层次、角度、侧面进行了广泛的探讨，论著众多，各有长处。虽然观点不同，但是，在一些基本点上还是比较接近的。

（1）它从构成成分、因素及其结构、功能等不同角度揭示了事物的内在本质与规律，使人类的认识深入到事物的内部，因此，成为近现代科学技术建立与发展的主要方法。在物理学领域，它使人类对物质的认识由分子到原子、由原子到基本粒子，由较大的基本粒子到较小的基本粒子如夸克。在生物学领域，人类的认识由器官到细胞，由细胞到生物大分子，并深入到 DNA 的内部找到遗传密码。

（2）它把事物从周围环境的复杂联系中剥离出来，排除干扰，使之以纯净、理想的状态表现出来，简单化处理，便于分清真相与假象、本质与现象，为人类对事物本质与规律的认识提供了有力的手段。最典型的形式就是科学实验，分析实验是科学实验的主要内容，这是使研究对象纯净化、理想化的主要手段，是分析的实践工具，为理性分析提供了丰富的资料，使近现代科学成为实证科学。可以说，没有科学实验就没有现在的科学技术，近现代科学技术主要是随着科学实验的发展而发展的。

（3）逻辑学是分析思维的基本工具或手段，科学实验所获得的资料，只有运用逻辑的手段进行理性分析，才能实现对事物本质与规律的认识，建立科学理论；逻辑的严密推演，使科学实验所得数据、资料的真实性到结论的真实性得到了保证。因

此，逻辑学是建立近现代科学理论的基本工具，为科学理论的严密性提供了保证。正因为如此，西方人非常推崇逻辑，把逻辑性与理性等同起来。

（4）数学的运用使分析思维定量化、精确化，这是近代以来还原论取得成功的主要原因之一。定量分析，不仅成为自然科学的基本手段，也是自然科学成熟程度的基本标志，数学模型成为事物规律的主要表现形式之一，而且正在逐渐扩展到人文、社会科学，各种数据的运用与分析在人文、社会科学论著中的作用越来越重要，数量经济学是其中的典型事例。

清代的赵翼在《论诗》中说："江山代有才人出，各领风骚数百年。"

从人类发展的历史看，整体论与还原论确实已经"各领风骚数百年"。在十五世纪以前的两千年中，整体论思想在西方没有得到充分发展，在中国却得到了比较充分的发展；近代以来的四五百年中，还原论没有在中国得到充分发展，却在西方充分地展示出其旺盛的生命力，为近现代科学技术的发展发挥了重要的作用，这是不争的事实。近代以来的历史证明，以中国传统思维方式为代表的整体论，确实存在许多缺点；近代科学技术之所以没有在中国产生，原因很多，整体论局限性的束缚是其主要原因之一。这是近百年来关于中国传统思维方式讨论中多数人的观点。20世纪科学的发展，特别是系统科学、复杂性科学的产生，认识到还原论的许多局限性，因此，把它从近代以来"惟我独尊"的神坛上拉下来，也是自然的。但是，拉下来的目的不是从根本上否定、抛弃它，而是把它摆在本来应有的恰当位置上。

二、整体论与还原论的优势互补、辩证统一

现代关于整体论与还原论的讨论，是从还原论的局限性展开的。

（一）还原论的局限性日渐显露

20世纪以来，科学界通过对许多复杂事物的深入研究，逐步认识到，长期来卓有成效的还原论是处理不了了。上世纪末，物理领域、生物领域、社会经济领域差不多发出了共同的呼声：突破还原论。美国《科学》(Science)杂志于1999年4月2日发表了一个题为"复杂系统"的专辑，邀请了物理、化学、生物、经济、生态环境、神经科学等方面的8位科学家，撰写了他们所从事的领域中关于复杂系统的研究进展，但两位编者在前言中却以"超越还原论"为标题，就说明了这个形势。

上世纪40年代以来，许多著名科学家为"突破还原论"作了不懈的努力。

奥地利理论生物学家贝塔朗菲(L. V. Bertalanffy，1910～1971)1945年发表的《关于一般系统论》，概括出不同领域中的系统都具有整体性、关联性、动态性、有序性和预决性等共性，认为应把生物整体及其环境作为一个系统来研究，不能沿用研究无机界问题常用的还原论的分析方法。

60年代以后，特别是70年代，在把事物当作一个系统研究方面，取得了一系列成就。如普利高津（I. Prigogine，1917～2003）的耗散结构理论，哈肯（H. Haken，1927～ ）的协同学，托姆（R・Thom）的突变论，艾根（M. Eigen，1927～ ）的超循环理论等，从不同角度揭示了系统更深刻的性质和规律，为系统科学做出重要贡献。

20世纪80年代国际科学界兴起了对复杂性的研究，标志是，1984年底美国建立了一个圣菲研究所（Santa Fe Institute，SFI），“他们相信，他们正在凌厉地冲破自牛顿以来一直统治着科学的线性的、简化论的思维方式”。[4]他们把经济、生态、免疫、胚胎、神经系统及计算机网络等称为复杂适应系统，认为存在某些一般性的规律控制着这些复杂适应系统的行为。其中有些人在运用还原论方法进行科学研究方面是大师级人物，他们能够开始意识到还原论的局限性，是很不容易的。认知心理学与人工智能研究的先驱、诺贝尔经济学奖获得者H・西蒙，在其《人工科学》1996年第三版中，从人类对系统研究的历史到复杂性研究做了考察，认为复杂性是我们生活的世界，以及与其共栖的系统的关键特征；这与钱学森提出的复杂性是开放的复杂巨系统的动力学特征颇为相似。

这些人想突破还原论是对的，但是还未能把整体论与还原论辩证地统一起来，还未能正确理解人与计算机之间的关系。

（二）整体论与还原论的优势互补、辩证统一是必然的历史趋势

由还原论局限性的讨论所引发出来的迫切问题是，今后的发展趋势。历史不会倒退，也不是圆圈式地回复，而是螺旋式的上升、前进。未来人类的思维方式，既不可能再是还原论的一统天下，也不可能是整体论重新占据统治地位，而是整体论与还原论的优势互补、辩证统一。很多学者都不同程度地讨论过，多数人都认为这是21世纪思维方式发展的必然趋势。

20世纪80年代，普利高津指出，中国文化“具有一种远非消极的整体和谐。这种整体和谐是由各种对抗过程间的复杂平衡造成的。”哈肯则提出“协同学和中国古代思想在整体性观念上有深刻的联系”。卡普拉在1991年《物理学之道——现代物理和东方神秘主义之间的相似性的探讨》第三版中归纳了科学中的6种新观点，其中有四个同整体论与还原论的优势互补、辩证统一密切相关：1，从把了解部分性质为主转为把整体放在主要地位；3，从客观科学到认识科学，在研究自然时不能不谈到自己（测不准原理）；5，从“真理”走向近似描述；6，从人类对自然的控制和主宰态度转向两者的合作和非暴力。[5]普利高津在《确定性的终结——时间、混沌与新自然法则》一书的中文版序中讲得更明确：西方科学和西方哲学一贯强调主体与客体之间的二元性，这与注重天人合一的中国哲学相悖；本书所阐述的结果把现代科学拉近中国哲学；自组织的宇宙也是“自发”的世界，它表达一种与西方科学的经典还原论不同的整体自然观，愈益接近两种文化传统的交汇点；必须保留已证明相当成功

的西方科学的分析观点，同时必须重新表述把自然的自发性和创造性囊括在内的自然法则。“在本世纪末，我们并非面对科学的终结，而是目睹新科学的萌生。我衷心希望，中国青年一代科学家能为创建这一新科学做出贡献。”[6]

我国学者近年来也有很多这方面的论述。中国科学院院长路甬祥指出：“当代科学面临的一些理论难题，正孕育着21世纪科学飞跃的生机。”“由于客观世界的统一性、多样性和相关性，也由于科学的发展和深化，科学在继续分化的同时，更多地呈现交叉和综合的趋势。未来的科学一方面将继续沿着原有的科学结构进一步分化和深入，另一方面，则将向着综合和系统的方向发展。”[7]哲学家李德顺认为：“21世纪，人类已经为自己创造了一个非常辉煌的迅猛发展的现代文明，但这个文明在20世纪末叶已暴露出很多弊端，遇到了很多新的问题，陷入了某种困境。在这个困境面前，科学技术和社会实践领域出现了一些新的、值得注意的迹象或端倪。总的感觉是，人类的思维面临着一个新的大变革，即处在第二次巨大飞跃的前夜。”“现代文明思维又有三个缺陷，即抽象性、隔离性和凝固性，因此这种思维有待于突破。21世纪人类思维方式变革的趋势表现为：从实践思维到关系思维；从客体思维进入主体思维；从单向思维进入多向思维；从静态的直观思维进入动态的变革思维。”[8]青年科学哲学家刘华杰把近代科学称为“第一种科学”，把20世纪70年代中叶开始酝酿的另一种科学称为“第二种科学”；认为迄今它只有一个不很清楚的萌芽，至其崭露头脚、结出丰硕果实，大概还需要100年时间，至其告一段落走向下一阶段，可能还需要300年；第二种科学也是理性的，是在第一种科学的基础上的发展，不是根本否定第一种科学，而是要超越它；这种科学是“整体性的科学”，关于复杂性的科学，目前已开始这方面的艰难探索，在国外有圣非学派，中国有系统学学派等。[9]心理学家傅世侠明确地提出“东西方思维方式的优势互补”这个论断，作了比较系统、全面的论证，[10]难能可贵。中国科技大学校长朱清时与科技记者姜岩对“东方科学文化的复兴”进行了比较深入、具体的考察。他们认为，20世纪科学的发展，从世纪初的相对论、量子论到世纪末的复杂性科学，向西方传统的思维方式提出了挑战，暴露出还原论的许多问题和局限性；一些西方学者提出的“科学的终结”实际上是西方近代科学与思维方式的“终结”；许多科学事实证明，东方整体论的思维方式逐渐显示出优越性和生命力。朱、姜援引的资料丰富，很多分析确有独到之处，对于东方文明的复兴引用大量事实进行了可贵的论证，比较有说服力。在这方面应该说是非常难得的。但是，未来的文明不是东方文明战胜西方文明，不是东方的思维方式战胜西方的思维方式，而是东西方文明、东西方思维方式——整体论与还原论的相互结合、优势互补、辩证统一；只有两者的结合、互补、辩证统一，才能克服各自的不足与片面性。在这一点上，朱、姜虽然在第二章的第三节“东西方的科学思想与方法是互补的”也曾论证到，但显然论证得不够充分。原因是，这不是他们的主题，他们的主题是《东方科学文明的复兴》，对于这个主题来说，他们的论证还是比较充分的。

（三）整体论与还原论优势互补、辩证统一中的几个问题

整体论与还原论的优势互补、辩证统一，说起来容易，实际做起来并不容易。因为，思维方式、方法论是有很大的惰性的，要克服这种惰性，有一个认识提高的过程，还有一个克服思维定势的过程，不可能短期内完成，起码要经过几代人的努力，要上百年甚至几百年才能实现。

首先，要充分认识还原论与整体论优势互补、辩证统一的必要性与可能性。其必要性主要体现在两个方面。第一，各自的优势都具有片面性、局限性，只要从各自的领域跳出来，站在较高的层次上回头往下看，就会发现，对方的优势正好是自己的劣势。如果仅仅沾沾自喜于自己的优势，看不到自己的劣势，那就会在认识与实践中碰壁、失败。第二，迄今为止人类认识、适应、改造客观世界的历史显示出，整体论虽然在 16 世纪以前具有明显的优势，但是，在近代以来的发展中明显地暴露出其缺点和劣势，逐渐被还原论所取代；20 世纪以来科学技术的发展，也日益地暴露出还原论的缺点与劣势，表明它也无法完成认识、适应、改造客观世界的任务，需要整体论的补充。至于可能性，主要表现在，它们两者不是互相排斥的，正如一切矛盾那样，都是矛盾统一体中的一个方面，相互依存、相互补充，只有充分地发挥各自的优势，实现互补、统一，才能形成人类完整的思维方式。

其次，在继续充分地发挥各自优势的同时，要自觉地注意、警惕各自的劣势、局限性；只有切身地体会到自己的劣势、局限性，才能想办法克服、弥补，才能看到对方的长处，取长补短，实现互补。这将是一个漫长的过程。现在，虽然系统科学、复杂性研究正在蓬勃兴起，但是，不论东方还是西方，真正体验、认识到还原论局限性的科学家还是少数，还原论不仅现在还占据着统治地位，今后相当长的一个时期内还是如此；还原论还在继续显示其优越性，它的成功与优势也强化了其思维定势，增加了惰性。

再次，系统科学、复杂性研究，既不能单纯地依靠还原论，否则，无法理解系统整体属性的涌现问题；也不能单纯地依靠整体论，否则，难以深入到系统内部各个子系统及其相互之间的关系；只有把还原论与整体论有机地结合起来，实现优势互补、辩证统一，才能做到。因此，系统科学、复杂性研究是实现还原论与整体论优势互补、辩证统一的科学；应该加强系统科学、复杂性问题的研究，在充分利用还原论优势的基础上，逐步弄清楚整体属性涌现的机制，逐步获得、积累还原论与整体论优势互补、辩证统一的经验、教训；只有这样的经验教训逐渐地积累得比较充分的时候，才能进行理论上的总结、概括，形成相应的理论，才能真正实现它们的优势互补、辩证统一。其中，整体属性的结构、本质及其涌现机制，是研究的重点与难点，在突破它以前，是不可能真正实现还原论与整体论的优势互补、辩证统一的。这就是系统科学、复杂性问题研究所面临的紧迫任务。

第四，还原论主要依靠抽象思维，整体论主要依靠形象思维。因此，要实现还原论与整体论的优势互补、辩证统一，就必须综合运用抽象思维与形象思维。抽象思维与形象思维的优势互补、辩证统一，是还原论与整体论实现优势互补、辩证统一的重要内容。

在西方，非常推崇形式逻辑，至今仍然只承认抽象逻辑思维是惟一的思维形态；虽然有些心理学家与文艺工作者研究过形象思维中的一些问题，形象思维这个概念首先也是由俄国的别林斯基于19世纪中叶提出来的；但总的说来，既不承认形象思维，更不承认直观动作（实践操作）思维。既然不承认形象思维，自然也就不可能进行专门研究。我们国内的心理学界，基本上也是沿着西方心理学的路线，不研究形象思维。真正承认形象思维的只有文艺界与思维科学界，真正研究的也只有思维科学界，并把它当作思维科学研究的突破口。这样，问题及其严重性也就比较清楚了。要实现抽象思维与形象思维的优势互补、辩证统一，首先，要打破国内外的单一抽象思维论，承认形象思维的存在及其重大意义，就必须加强形象思维的研究，尽早拿出过硬的研究成果，让那些否认者认识到单一抽象思维论的局限性与危害，逐渐承认形象思维及其意义。这是一项十分艰巨而长期的任务，需要文艺家、文艺理论工作者、文艺心理学家、美学家、人工智能专家与思维科学学者携起手来，争取尽快取得一些突破，单靠一个领域的学者孤军奋战是难以奏效的。只有打破单一的抽象思维论，使形象思维得到广泛的实际（非口头）承认，才谈得上抽象思维与形象思维的综合运用。其次，抽象思维与形象思维各有优势，也各有局限性与劣势。抽象思维的优势在于，能够一步一步地进行严密的推理，而且，对于这种推理的研究日渐成熟，主要标志就是能够编制计算机程序，让计算机代替一部分抽象思维功能。“蓝深”之所以能够战胜国际象棋冠军卡斯帕罗夫，就是因为它充分地发挥了抽象思维推演严密与计算机运算快、存储量大的优势。形象思维的优势在于，能够从整体出发考虑问题，运用联想、想象、象征、比喻、直觉、灵感处理问题；虽然不一定准确、可靠，然而，一旦成功，往往具有创造性；由于它极其灵活、复杂，难以把握，也缺乏系统、深入的研究，至今没有掌握其规律，计算机还难以模拟。计算机之所以在模拟围棋上成效甚微，主要就是因为围棋靠的是形象思维把握全局。如果形象思维研究有所突破，哪怕是掌握一点点规律，都势必会大大提高人的形象思维能力和创造性思维能力。如果人们对抽象思维与形象思维各自的优势与劣势有了比较清醒的认识，有意识地综合运用，实现优势互补、辩证统一，那么，认识问题、处理问题、创造性地解决问题的能力势必会大幅度地提高。

三、综合集成法是整体论与还原论辩证统一的有效方法论

整体论与还原论的优势互补、辩证统一是未来发展的必然趋势，其实现的具体

形式是多种多样的，但是，要真正实现并不容易。从目前所见到的研究情况与成果可以看到，钱学森院士于20世纪80年代末、90年代初提出的处理开放的复杂巨系统的从定性到定量的综合集成法是比较现实、有效的方法论。15年来的一系列研究成果充分地显示出其旺盛的生命力和优势，对未来科学技术的发展将产生重大影响，为诸多复杂的科学问题的探索、社会发展中复杂问题的民主决策提出了可供选择的现实、有效方法。

（一）从定性到定量综合集成法的形成与发展

从定性到定量综合集成法是钱学森院士晚年的原发性理论创新. 根据大量系统工程实践提炼"开放的复杂巨系统"概念大致经历了巨系统→复杂巨系统→开放的复杂巨系统三个阶段，历时12年。[11]综合集成法的提炼大致经历了"定性与定量相结合的系统工程方法"→"定性定量相结合的综合集成法"→"从定性到定量综合集成法"这样三个阶段，历时7年；并在此基础上继续前进，进一步地提出了实现综合集成法的组织形式——从定性到定量综合集成研讨厅体系，称之为大成智慧工程，在这样一系列大成智慧工程的基础上可以提炼成大成智慧学。[12]这一系列新思想，使从定性到定量综合集成法得到丰富与发展，形成内容丰富、深邃的大成智慧理论，这是非常难能可贵的！因此，他与于景元、戴汝为合写、发表于《自然杂志》1990年第1期上的"一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论"被学术界称为系统科学发展的第二个里程碑！

（二）从定性到定量综合集成法的基本特点

从定性到定量综合集成法是一种新的方法论，既不同于西方古代与东方传统的整体论，也不同于西方近代以来盛行的还原论，而是整体论与还原论、东西方思维方式的优势互补、辩证统一，具有如下重要特点：

第一，实现了经验知识与科学理论、定性认识与定量认识的优势互补以及多种学科的有机结合与辩证统一。

专家的经验知识是在实践中积累起来的，主要是靠形象思维对客观事物宏观整体的定性认识，许多内容属于前科学状态；还原论往往忽视它的存在和价值，但是，它却是创新思维的关键，往往是新思想、新技术、新形象、新概念产生的源泉，也是科学家们经常用来指导科研方向的"毛估"产生的依据。胡适有句名言："大胆假设，小心求证。"从综合集成法的角度来看，这个论断还是很有道理的。假设主要是从宏观、整体上运用形象思维的想象提出的定性判断，往往是前所未有的或与现有的理论、技术、法律、制度相矛盾的；这样的假设，没有丰富的经验积累和一定的理论知识是提不出来的；没有足够的勇气和胆量也是难以做到的。但要证明它的真实性、正确性，却需要广泛、细致地搜集大量、可靠的数据和事实，运用逻辑思维进行严谨的

论证。没有大胆假设就不可能创新，没有小心求证，创新就缺乏必要的科学根据，难以得到确认。由于数学的引进，使精确的定量分析成为还原论的优势，侧重定性分析的模糊思维则是整体论的优势；把精确思维与模糊思维辩证地统一起来，也是还原论与整体论优势互补、辩证统一的重要内容。从人类认识的发展历程看，总是先有定性认识，然后才形成定量认识；而且，也不是任何事物都能量化的，对难以量化的事物只能形成定性认识。从人类认识的实际情况看，首先是根据实践经验的积累形成半经验半理论比较模糊的定性判断，然后随着认识、研究的深入才能逐渐形成比较精确的定量判断。尤其是对于复杂事物的认识，大致都是这样。其实，这正是人们把精确思维与模糊思维辩证地统一起来的实践形式：能够量化的事物，先定性后定量；不能量化的事物，始终只能是定性认识。

在从定性到定量综合集成的过程中，多学科的交叉、结合起着重要作用。现代科学技术既高度分化又高度综合。要解决现实提出的问题，需要多学科结合起来共同攻关。各个学科的专家在综合集成中不仅可以充分发挥各自的专长，而且不同学术观点、方法之间还能够相互启发、激励，容易激发出新的思想火花；把这些专家的思想综合集成时，也不是机械性的简单相加，而是形成一个比较完整的整体认识，涌现出一些新的只有该整体才具有的属性、内容，这就是整体大于部分之和即（1＋1＞2）的道理。

第二，人-机结合、以人为主，实现宏观研究与微观研究、形象思维与抽象思维、整体论与还原论、东方思维方式与西方思维方式的优势互补、辩证统一。

“人-机结合”中的人不是任意的个人，而是具有优良综合素质的专家群体——由相关的各个方面专家组成的整体，这是从定性到定量综合集成法的实施主体。他们采用集体、团队的工作方式，而不是个体研究的方式，并且由知识与经验丰富、视野与思路开阔的科学家来组织、领导。只有这样的专家群体，根据各自丰富的经验，经过充分研讨，甚至激烈地争论，才能逐渐形成具有创新价值的定性判断，这个过程是处理开放的复杂巨系统问题的关键。“人-机结合”中的机是指高性能计算机体系，这是专家群体的工具，它不仅可以存储海量知识信息，丰富专家群体的知识结构，帮助专家快速处理大量信息、数据，完成大量复杂的计算，而且还可以帮助专家按照民主集中制的原则统一大家的意见，建立仿真模型、进行仿真实验。凡是计算机能够做的都让计算机去做，腾出人的精力去做那些计算机不能做的事；人与计算机既实现了互补，又坚持了以人为主的原则。目前的诺依曼计算机还难以模拟人的形象思维和创造性思维，专家根据有限知识和经验提出的定性判断、假设，目前任何高级的计算机都无法提出来，而这正是创新思维的关键所在。人-机结合、以人为主，正是从定性到定量综合集成法与美国圣菲研究所根本不同的技术路线。因为人与机器的最大区别是，人能够运用形象思维从宏观上进行研究，能够看清整体发展、演化态势，发现、提出问题和新见解；机器擅长抽象思维，能够进行严密推演和精确

计算；但是，任何机器都不能发现、提出问题和新见解。这是计算机之所以不能模拟围棋的根本原因。这样，通过人- 机结合、以人为主，就可以实现宏观研究与微观研究、形象思维与抽象思维、整体论与还原论、东方思维方式与西方思维方式的优势互补、辩证统一。

第三，通过社会思维发挥了综合优势与整体优势。

从定性到定量综合集成研讨厅体系，正是比较现实的人-机结合、人-网结合、以人为主的信息加工系统、知识生产系统、智慧集成系统，是知识生产力和精神生产力的实践形式。各种社会实践中提出的具体问题，确实有许多简单或比较简单的问题，只要单个人或少数人就能够解决；但是，也不能不看到，复杂、比较复杂、极其复杂的问题越来越多，这是近二、三十年来“复杂性研究”日益引起广泛重视的客观根据；世界各国都非常重视创新体系的建设，也是这种客观需求的反映。如果说 20 世纪中叶以前的科学研究主要是靠科技人员的个人奋斗实现创新的，那么从 20 世纪中叶以后，靠各个学科的综合、各个方面的专家集体协作实现重大创新已经成为必然的趋势。从美国的曼哈顿工程到阿波罗计划，从我国的“两弹一星”到“神州号”载人飞船，从欧洲大型电子对撞机的建造到近年来兴起的人类基因组计划等“大科学”计划，都是群体协作研究，实现各行各业的团结协作，取长补短，充分发挥综合优势和整体优势取得成功的。钱学森把系统科学与思维科学结合起来，将人类的这种思维形态称作社会思维，把实现这种大规模的社会思维活动的组织形式称作“从定性到定量综合集成研讨厅”。显然，它不仅在大型科研、工程项目中得到成功应用，在社会经济、军事、交通等领域也完全可以适用，在 21 世纪的科学技术、社会管理领域的创新中将发挥越来越重要的作用，为实现决策的科学化、民主化提供了组织形式、操作平台。

（三）从定性到定量综合集成法的影响

从定性到定量综合集成法提出以后，引起国内、国际学术界的广泛关注，产生了重要影响。

香山科学会议是我国科技界高档次的学术研讨会，以基础研究的科学前沿问题与我国重大工程技术领域中的科学问题为主要议题，展望未来发展趋势，介绍最新的突破性进展，交流新的学术思想与方法，分析新的科学生长点。从 1993 年 4 月正式创办以来，到 2005 年底，已经举办了 271 次，其中直接以从定性到定量综合集成法以及复杂性研究为主题的就有 5 次，还有 4 次的议题与它密切相关。这在香山科学会议上是仅次于脑科学方面的议题，居第二位。与会专家高度赞扬了钱学森院士提出的“从定性到定量综合集成法”、“从定性到定量综合集成研讨厅体系”和“大成智慧工程”，以及在智能系统、社会经济系统、人口系统、国防战略等领域研究所取得的成果，普遍认为从定性到定量综合集成法是研究和处理开放的复杂巨系统的一种

比较现实、有效的方法。

随着人们对从定性到定量综合集成法认识的提高，除在航天系统工程中继续使用、发挥巨大作用外，在国防战略分析、宏观经济决策、社会经济管理以及一些重大的工程系统等领域，也陆续得到广泛应用。1992～1996 年，受国务院研究室的委托，在国家 863 计划智能计算机课题组的支持下，进行了宏观经济智能决策支持系统（MEIDSS）的研究与开发，这是第一个根据“从定性到定量综合集成法”进行设计的国家级重大科研项目，是一个人-机结合系统，形成人-机智能优势互补，“人帮机、机帮人”的智能决策支持系统。从 1999 年开始，国家自然科学基金委投资 500 万元，开展“支持宏观经济决策的人-机结合综合集成体系研究”。2003 年 9 月，应第 17 届 JISR-IIASA[13] 复杂系统建模与集成政策评估方法论及工具研讨会（CSM'03）组委会的邀请，该课题组代表团赴国际应用系统分析研究所进行了为期 4 天的学术交流。一系列报告和演示为与会者勾画了综合集成研讨厅体系的大致轮廓以及应用该方法论在宏观经济研究方面所获得的成就，引起与会专家的浓厚兴趣、普遍关注。

（四）从定性到定量综合集成法的重大意义

从定性到定量综合集成法是处理开放的复杂巨系统的方法论。开放的复杂巨系统是宇宙间广泛存在的，从广袤的宇宙空间到我们所在的太阳系，从我们生活的地球到各种动植物，从人类社会到我们每个人，从人体到意识、思维以及整个精神世界，都是开放的复杂巨系统。因此，从定性到定量综合集成法的应用领域非常广泛。

从定性到定量综合集成法刚刚形成，还不很完善、成熟；人们对它的认识、接受、应用还需要一个过程。因此，要恰当、准确、全面地阐述它的重大意义还为时尚早。但是，其基本意义还是可以看得比较清楚的，那就是，这是人类思维方式、方法论上的革命性变革。近十几年来，复杂性问题已经成为世界科学家们竞相研究的热点，国际国内许多大师级的科学家，其中包括一些著名的诺贝尔奖获得者，纷纷将精力转向复杂性问题的研究，形成一股强劲的研究热潮，并逐渐在国际上形成了 3 个研究中心，以钱学森为首的中国系统学派就是其中之一。具有讽刺意味的是，国外的一些向还原论发起冲击的复杂性问题研究，其方法论却依然难以摆脱还原论的影响，致使他们的复杂性研究陷入了困惑境地。与他们形成对照的是，我们国内以钱学森为首的系统学派，由于有马克思主义哲学的指导，把西方以分析为主的还原论思维方式与以综合为主的整体论的中国传统思维方式辩证地统一起来，形成了从定性到定量综合集成法，这是人类历史上方法论、思维方式的革命性变革，既发扬、超越了近代西方分析为主的还原论，又继承、发展了具有悠久历史传统的以综合为主的整体论，使两者有机地、辩证地统一起来，成为一种崭新的方法论、思维方式。我国著名的管理科学家、全国人大常委会副委员长成思危，在为北京大学研究生所作

的关于复杂性研究问题的学术报告中明确地说，钱学森系统学派关于从定性到定量综合集成法是研究、处理复杂性问题的比较现实有效的方法论，使我们在复杂性研究方面走在了世界的前列。[14]

参考文献

[1] 朱清时、姜岩：《东方科学文化的复兴》，北京科学技术出版社，2004年

[2]《马克思恩格斯选集》第3卷，北京人民出版社，1995年

[3] [英]Gallagher R. Apperzeller T. Beyond Reduction. Science、1999，284(5411)：79

[4] [美]米·沃尔德罗普著：《复杂》，北京，三联书店，1997年

[5] 宋正海、孙关龙主编：《中国传统文化与现代科学技术》，浙江教育出版社，1999年

[6] [比] 普利高津著，湛敏译，《确定性的终结》，上海科技教育出版社，1998年

[7] 路甬祥：《科学技术百年的回顾和展望》，载《科学时报》，1999年10月18日

[8] 李德顺：《21世纪人类思维方式的变革趋势》，《社会科学辑刊》，2003年第1期

[9] 刘华杰：《论第二种科学》，《中华读书报》，1998年2月11日

[10] 傅世侠、罗玲玲：《科学创造方法论》，中国经济出版社，2000年3月

[11] 卢明森：《"开放的复杂巨系统"概念的形成》，《中国工程科学》，2004年第6卷第5期

[12] 卢明森：《从定性到定量综合集成法的形成与发展》，《中国工程科学》，2005年第7卷第1期

[13] IIASA是国际应用系统分析研究所(International Institute for Applied Systems Analysis — IIASA)的简称，是国际最负盛名的系统科学研究机构之一，它主要针对环境、经济和社会等与人类活动密切相关的领域开展跨学科的研究。自从1972年成立以来，在整个人类社会共同关心的许多问题(例如能源、水资源、环境、风险与住房等)上所获得的卓越研究成果使其成为成功的国际科研合作机构。由JISR和IIASA共同举办的复杂系统建模与集成政策评估方法论及工具研讨会，以基于模型的复杂系统分析为议题，其目的是发掘与总结用于解决实际问题的系统分析方法论和工具

[14] 以上请参阅卢明森主编：《创新思维学引论》第九章，高等教育出版社，2005年7月

钱学森论系统方法论

苗东升

中国人民大学哲学系，北京，100872

钱学森认为系统论是沟通系统科学和哲学的桥梁，属于哲学范畴。系统方法论是系统论的核心内容之一，系统科学给整个科学技术带来的重大变化，首先在于科学方法论及思维方式的变革，其影响遍及科学技术和学术研究的所有领域。在1978年以来的大量文章、讲话、书信中，钱学森从不同角度、针对不同问题谈及系统方法论，形式上十分零散，内容却相当丰富深刻。本文试图依据笔者的理解给以初步的疏理。

一、辩证唯物论是系统方法论的哲学基础

一定的科学方法论总要接受一定哲学观点和立场的指导与制约。青年钱学森是坚定的科学唯物主义者，在美国从事力学、航天科技和控制论研究的20年中，形成一套自己颇为得意的研究方法和心得，回国后却发现唯物辩证法早已讲清楚了。钱学森曾以欣喜的心情著文谈到这一点，从此开始十分自觉地以唯物辩证法来指导工作，并迅速完成了从科学唯物主义向辩证唯物主义的转变。自那时以来，他的哲学信念从未发生动摇，而且弥老弥坚。应当承认，随着科学技术和社会的日益复杂化，哲学思想及其营垒划分也在日益复杂化。但在钱学森的视野中，大而化之地看，哲学基本营垒的划分仍然是唯心论和唯物论、机械论和辩证法。尽管这种传统划分近30年来遭到大量质疑和批评，钱学森却深信不疑，在不同场合、利用不同机会宣传他的观点，努力影响他的合作者和追随者，要他们坚持唯物论和辩证法，警惕唯心论和机械论。对于钱学森的这一哲学取向有不同评价是正常的，但他在哲学基本观点上不随波逐流，确实难能可贵。

钱学森的主要研究方向从1978年转向系统科学以后，始终以辩证唯物论作为哲学指导。他在这方面发表的第一篇文章《组织管理的技术——系统工程》（与他人合写）鲜明地体现了这一点。在谈及事理这个新概念时，钱学森等写道："当然'事理'同数学、物理都充满了辩证法的道理，都是以辩证唯物主义作指导的。"[1]他们后来关于事理概念和事理学的论述都富含辩证思想。在1979年的一次讲演中，钱学森更把现代系统概念的起源追溯到恩格斯，提出："我们搞系统工程也当然要用马克

思主义的哲学来指导”，并解释为“就是用马克思主义哲学来指导我们的思维，然后我们才能够把稳方向”[2]。思维方式跟方法论密切联系，指导思维包含指导方法论。系统科学的方法论要以马克思主义哲学为指导，此一原则已在本次讲演中表达得很清楚。这一思想在同一时期论述社会系统工程、军事系统工程、科研系统工程、农业系统工程等著作中都有明显的体现。

经过1978年到1980年期间分门别类考察不同部门系统工程之后，钱学森对系统概念、系统思想、系统方法有了深入理解，并总结于《系统思想和系统工程》一文中。他以恩格斯关于近代科学的发展演变所作的唯物辩证的历史分析[3]为依据，对系统概念和系统思想的发生、发展、演变作了历史、逻辑、哲学相统一的分析论证，阐明系统思想如何从经验上升到哲学，并“在辩证唯物主义那里取得了哲学的表达形式”；又如何经历从哲学到科学、从思辨的定性到定量的发展，最终实现了“系统思想方法从一种哲学思维发展成为专门的科学”的转变[1]。从字面看，他讲的不是系统方法论，而是系统思想方法。把方法和思想联系起来，把系统思想方法作为一种哲学思维来考察，实际就是谈方法论，因为所谓方法论无非是从哲学高度论述方法问题，重在谈方法的思想性和哲理性，而非方法的操作性。为什么说系统方法的哲学基础是辩证唯物论，这篇文章给出深刻的说明。

在同一时期，钱学森用很大精力探讨现代科学技术体系问题。他把整个人类知识当作有机联系的系统来考察，发现该体系纵向看具有层次结构，作为哲学的辩证唯物论位于最高层，通过一座座桥梁联系着各个部门科学；横向看，现代科学技术由多个部门（最后归结为11大部门）组成，它们都接受辩证唯物论的哲学指导，通过11座桥梁（哲学分论）同辩证唯物论相联系。系统科学是11大部门之一，系统论是连通系统科学和马克思主义哲学的桥梁。这就从科学技术的整体结构上明确了系统科学、系统论与马克思主义哲学的关系。承认这个体系结构，系统方法论以辩证唯物论为哲学基础就显得更加明确肯定了。

除了从一般理论上阐述辩证唯物论的指导作用外，钱学森还在具体研究中身体力行地贯彻这一原则。1978年以来，钱学森的研究成果都是以讲演、文章、书信的形式发表的，先后集结出版了《论系统工程》、《关于思维科学》、《论地理科学》、《论宏观建筑与微观建筑》、《人体科学与当代科学技术发展纵横观》、《科学的艺术和艺术的科学》和《创建系统学》等。浏览这些文集立即发现，贯穿其中的一条红线就是系统科学要坚持辩证唯物论的哲学指导，强调系统科学的研究和应用必须克服唯心论和机械唯物论。在他看来，唯心论在科学研究中的主要表现是脱离实际的主观主义，如一味追求数学模型的精确漂亮，轻视问题的经验含义；机械唯物论的主要表现是死心眼，如埋头于细节，埋头于量变，不从整体上把握事物，不重视研究质变。当然，他对唯心论、唯物论、机械论、辩证法的一些具体表述和评价可以商榷，并非句句是真理，但整体上无疑是正确的，而且极有教益。

二、对还原论作辩证的分析批判

所谓批判，本意就是作一分为二的分析点评，而非一味否定。贝塔朗菲创建一般系统论是从批判还原论和分析思维入手的，追随他走向系统研究的学者都重视对还原论和分析思维的批判。但考察1978年至1981年期间钱学森关于系统科学的论述发现，他并未明确提及还原论。我们知道，钱学森是从系统工程、运筹学和控制论走向系统科学的，而这三门学科都不属于基础理论，更不是作为哲学分论的系统论，它们的代表性著作都不明确提及还原论。这并不奇怪，早期系统工程、运筹学和控制论处理的是简单系统，主要工具实质上仍然是还原论方法。在1980年以前，钱学森的主要工作是重新界定系统工程和运筹学，消除学科划界上的混乱认识，把系统工程推广应用于各个实践领域，还原论的局限性显然还不是他关注的主要问题。

钱学森是沿着三条道路走向对还原论进行反思的。其一，走出系统工程的范围，探索建立系统科学的基础理论系统学，首先接触到一般系统论，接受了贝塔朗菲对还原论的批判；接着又涉足耗散结构论和协同学，进一步强化了这种认识。其二，从系统工程、运筹学和控制论处理的简单性问题走向人体、社会等复杂性问题，比较还原论对简单系统的有效和对复杂巨系统的无效，钱学森着手从方法论上寻找问题的根源，审视还原论的必要性便凸现出来了。其三，研究现代科学技术体系（重点是自然科学和社会科学）的历史发展，必然要探讨还原论的得失。例如，物理学是否比生物学更基础？是否只有把生命现象追究到量子层次理论上才算彻底？评价还原论无法回避的这些尖锐问题，倡导人体科学的钱学森也不能不回答。钱学森曾认为“物理更基础一点”[4]，此乃还原论的重要论点，探索人体科学和系统科学促使他重新审视此说。在这一转变过程中，由陈信主持的人体科学研讨班发挥了重要作用，正是在这个学术平台上，钱学森以题为《现代科学技术的结构》的演讲（1983年3月）为起点，开始了他对还原论持久的反思和批判。

在科学和学术发展史上，背离辩证法常常导致从一个极端走向另一极端，犯下泼洗澡水的同时把小孩子也泼掉的错误。它在系统研究中的一种表现形式，就是把清算还原论之局限性变为全盘否定还原论。钱学森是还原论科学培养出来的大科学家，对还原论方法的巨大功效有相当深刻的体认，加上笃信辩证法，使他避免了这种片面性。为谨慎从事，起初他试图区分还原观和还原论、还原的观点和还原论观点、还原的方法和还原论方法。“还原的观点只是说我要把事情分析得越细我才能搞得越彻底，这还是对的，但只说这点还有点毛病，就是没强调综合的、整体的这一面的重要性。”[4]要解决问题得走还原观这一步，但如果“仅仅走这一步，不走其他的，这就成了还原论了。还原论是错误的”。[4]概言之，钱学森这个时期的看法是：还原观是必要的，但有片面性，还原论是错误的，应当抛弃。通过区分还原观和还原论

来体现辩证法的一分为二，对还原论全盘否定，这种说法不科学，很难让学界广泛接受。随着研究的深入，大约到 1985 年左右，钱学森不再作这种区分，统一使用还原论这个称谓，对它进行一分为二，从不同角度揭示它的弊病，不再简单地断言还原论是错误的。由此开始，他对还原论的批判一直延续到 90 年代末，不断有妙论公之于众。同批判还原论的难以计数的文献相比较，钱学森的有关论述显得言简意赅，精彩纷呈，这里就其要点略加评介。

什么是还原论？还原论首先是关于部分与整体关系的一种哲学观点，一种主张把整体还原到部分去研究的方法论。从部分和整体的关系看，钱学森给出这样的回答："还原论的方法是，如果要处理的这个问题太复杂，就把它切成几块来研究，如果这些块还复杂，可再切小，如果还复杂，再切小。越切越小。"[5]这种观点后面的一个未言明的假设是，还原或分解能够消除复杂性，只要切分得足够小，就可以把问题简化。还原论又是一种关于宇宙层次结构的哲学观点，一种主张到低层次去寻找高层次问题之答案的方法论。从事物的层次结构看，钱学森认为："还原观就是说你要研究一个问题要把它解剖开，研究更下级的、更细的东西，一层一层地往下解剖，这是还原观，要解决问题得走这一步。"[4]（1983）还原论必定联系着层次概念，认定客观世界的许多深层次问题必须用还原的方法去解决。这两方面相结合，简洁而准确地概括了还原论的核心观点。当然，还原方法也有个使用是否正确的问题，"用这种方法处理，你必须知道怎么切合理……如果不知道怎么切，乱切就可能把这个问题的本质特征切掉了，就改变了原来问题的性质。"[5]

如何公正而全面地评价还原论？历史地看，还原论对科学发展产生过巨大作用。钱学森对此给予充分肯定："近代科学的发展必须归功于从 18 世纪开始到 19 世纪的还原的观点，分析的观点……这个有它积极的一面。"[4]即使在今天，即使系统科学，还原论也必不可少："系统科学并不是要抛开局部细的结构不考虑，不是这样的，非要考虑不可"。[4]系统科学 60 年的历史表明，系统工程、运筹学和控制论不必说，就是处理简单巨系统问题的耗散结构论和协同学，同样离不开还原论。

但"建立在还原论基础上的所谓科学方法是有很大局限性的"[5]，而系统方法论主要关心的恰是揭示还原论的局限性，开辟超越这种局限性的途经。所以，得力于系统科学的发展，人们"终于认识到还原论方法之不足，这是件大事"。[5]对于简单系统和简单巨系统，客观存在正确的切分方法，只要掌握了这种方法即可用还原论解决问题。倘若对象是复杂巨系统问题，如科学技术面向 21 世纪的问题，中国现代化的战略问题等，原则上不存在这种切分方法，它们都无法通过把整体还原到部分来简化问题。开放复杂巨系统"那么复杂，你把它一分解，要紧的东西都跑了，没有了"，由此决定了"这些系统不能用近代科学都习惯于用的还原论的方法"[5]。

对还原论的分析批判同区分简单性和复杂性的问题密切相关。切克兰德在上世纪 70 年代指出："历史上，系统思维是作为应付复杂性的一种尝试而产生的，这种

复杂性(既存在于自然现象中,也存在于社会和人的现象中)使经典的科学方法的还原论归于失败。”[6](笔者对中译文有改动)指明还原论不能解决复杂性问题,是对系统方法论的一个重要贡献。钱学森在1990年代更进一步,明确从方法论角度划分简单性和复杂性,指出:“凡现在不能用还原论方法处理的或不宜用还原轮方法处理的问题,而要用或宜用新的科学方法处理的问题,都是复杂性问题,复杂巨系统就是这类问题。”[7]

彻底的还原论假定存在宇宙之砖,那个层次的物质形式是构成宇宙的最小成分,科学研究只有把问题还原到该层次才能获得最彻底的解决。原子、基本粒子的命名就反映这种哲学思想。但系统科学认为,对于每个具体问题,要使我们对系统的整体涌现性有一个精细的了解,需要而且只需要还原到一个适当层次,并非还原的层次越深就越好。钱学森对此有一个精彩的说法:“从科学的整体来说,彻底的还原论是不可能的,物质结构的层次是无穷无尽的,总还有下一个层次。我们实际都在妥协,还原到适可为止。”[8]这个论断以物质无限可分性原理为基础,有些学者不接受。不过,即使不承认物质无限可分,“还原到适可为止”也是适用而且重要的方法论原则。探究化学现象,还原到原子层次即可解决问题,一般无须深入到基本粒子层次。探究生命现象,还原到生物大分子即可,不必再深入到物理原子。文章作为以文字为载体的观念系统,还原到文字进行分析就行了,不必进一步还原到组成文字的笔画。如此这般,不一而足。正确选定系统的最小要素层次,还原到该层次即适可而止,是应用系统方法解决问题的必要前提条件。

为了从整体上认识和处理问题,系统思维要求把对象系统放到更大范围考察。钱学森就强调:要懂得你研制或管理的系统“本身又是它所从属的一个更大系统的组成部分”[1]。但扩大考查范围同样是相对的、辩证的。给“还原到适可为止”原则以对偶的推广,我们可以说:彻底的整体论也是不可能的,物质结构的层次是无穷无尽的,总还有上一个层次;我们实际都在妥协,扩大到适可为止。

三、系统论是整体论与还原论的辩证统一

辩证思维主张把一切事物都看成对立面的统一。什么是还原论的对立面?钱学森起初视之为系统论。如此处理,既不能准确理解还原论,也不能准确理解系统论。经过数年探索,他认识到“实际上与还原论相对立的是整体论”[4](1986),而不是系统论,应当从分析还原论和整体论既矛盾又统一的关系中认识还原论和整体论,进而认识系统论。

钱学森多年研究整体论和还原论而得出结论:不了解细节不行,只了解细节也不行;不讲整体不行,只讲整体也不行。上升到方法论来说,就是不要还原论不行,光要还原论也不行;不要整体论不行,光要整体论也不行。换言之,我们既要还原

论，又要整体论，两者缺一不可。仅仅这样讲还不是辩证法，也不是系统论，辩证法不是对立面的简单加和，系统论不是整体论和还原论的简单加和，而是两者的辩证统一。“我们所提倡的系统论，既不是整体论，也非还原论，而是整体论与还原论的辩证统一，是更高一层次的东西，即我们的系统论既包括整体论，也包括还原论。”[4] 自从贝塔朗菲倡导系统方法论以来，学界关于科学方法论的论争就存在两种片面性，要么尊奉还原论是惟一可能的科学方法论，全盘否定整体论的科学性；要么视还原论为过时的方法论，主张完全抛弃。从贝塔朗菲经普利高津、哈肯再到圣塔菲学者，都试图克服这种片面性，都有所贡献，又都没有把问题解决好。只有钱氏命题“系统论是整体论与还原论的辩证统一”才把问题从哲学上说透彻。对于建立作为连通系统科学和哲学之桥梁的系统论，这个命题也有重要价值。

命题“系统论是整体论与还原论的辩证统一”，只是一个最原则的提法，若不具体化就会空洞无物。一些学者对此命题颇不以为然，贬斥为变戏法。笔者就曾碰到这样的诘问：“你们讲整体论与还原论的辩证统一，请你给我辩证统一一下如何?”这确是一个不易回答的问题。困难在于，两个矛盾方面的具体统一方式千差万别，不能作形式化处理，只能具体问题具体解决。钱学森无疑注意到这个问题，并有所探索。就整体论与还原论这对矛盾而言，所谓辩证统一主要是部分与整体的辩证统一，宏观与微观的辩证统一，定性与定量的辩证统一。关键是从部分特性过渡到整体特性，从微观特性过渡到宏观特性，从定性描述过渡到定量描述。钱学森晚年创立的从定性到定量综合集成法，提供了一个如何实现整体论与还原论辩证统一的绝佳范例。

四、创立从定性到定量综合集成法

钱学森是技术科学大家、工程学大家，极为重视科研成果的应用。1978 年以来，他最关心的是把系统科学的一整套思想方法推广应用于中国社会生活的各个领域，把国家建设的各项工作都作为系统工程来搞。他在这个过程中逐步认识到，现实世界存在的系统应划分为简单系统（包括小系统和大系统）、简单巨系统和复杂巨系统几大类，它们的局整关系有性质上的差别，需用不同方法描述。控制论和运筹学处理的是简单系统，系统的部分（通常称为环节）和整体都属于宏观层次，把系统分解为环节后，还原论方法能够有效地描述这些环节的特性，再按照系统的结构模式把它们整合起来，即可完成从描述部分到描述整体的过渡。钱学森把这种方法称为直接综合法。耗散结构论、协同学处理的是简单巨系统，出现了小系统和大系统没有的宏观和微观的层次划分，部分与整体的关系主要归结为微观与宏观的关系。与简单系统比，宏、微两种尺度的巨大差别决定了从描述部分到描述整体的过渡有原则的不同。对于简单巨系统从微观描述过渡到宏观描述，直接综合法失效，必须

用统计综合法。协同学很好地解决了这个问题。而钱学森最关心的地理、人体、思维等对象属于复杂巨系统,社会更是特殊复杂巨系统,组成这类系统的要素不仅数目巨大,而且花色品种多,关系复杂多变,不仅直接综合法无效,统计综合法也无济于事。

直接综合法和统计综合法本质上仍然是还原论方法,只是按照系统思想作了某些修正。既然复杂性是不能或不宜用还原论方法解决的问题,处理复杂巨系统就必须真正跳出还原论的窠臼,创造新的系统思想和方法。这是钱学森晚年研究系统方法论的主攻方向。作为巨系统,关键也是如何从微观局部认识过渡到宏观整体认识。但巨型性和复杂性给系统带来一些新的重要特性,不可能用还原方法获得关于微观组分完备的精确认识,更不可能在平均场假设(不考虑微观组分的差别)基础上用统计综合法完成从微观到宏观的过渡。直接综合法和统计综合法都基于传统的科学推理方法,形式逻辑基本够用。处理复杂巨系统问题要用辩证逻辑,必须回到马克思主义哲学,特别是毛泽东的《实践论》和《矛盾论》。按照钱学森的理解,辩证思维就是"从事将感性认识上升到理性认识的思维过程",亦即"用来处理开放的复杂巨系统时的思维过程"。[5]回顾近 20 多年钱学森的学术研究轨迹可以看到,从定性到定量综合集成法的酝酿和形成过程是他学习和应用《实践论》和《矛盾论》的过程。实施从定性到定量综合集成的过程就是毛泽东讲的将感性认识上升到理性认识的思维过程,差别在于毛泽东讲的是适用于一切系统的一般认识过程,钱学森研究的是处理开放复杂巨系统问题的特殊认识过程。反过来说,也正因为开放复杂巨系统的特殊性,综合集成法的提出深化了《实践论》对认识辩证运动的描述[9]。

钱学森认为,"综合集成,即辩证统一"[5];"从定性到定量综合集成法,实质上体现了辩证思维"[5]。根据何在?应用从定性到定量综合集成法解决复杂巨系统问题的过程包含一系列的矛盾对立面:局部与整体,微观与宏观,经验与理论,定性与定量,感性与理性,直观思维与逻辑思维,抽象思维与形象思维,个人与群体,人与机器,等等。综合集成不是把这些对立面机械地汇拢在一起,形成拼盘,而是让这些对立面在综合集成过程中反复碰撞,既影响对方又改变自身,在不断反复中逐步融合统一,实现从微观到宏观、从局部到整体、从定性到定量、从感性认识到理性认识的辩证转化,最终从局部的定性认识中涌现出整体的定量认识。这就是认识的辩证运动。

从定性到定量综合集成法并非纯粹理论思考的产物,而是在总结实践经验基础上的理论创造。它有两方面的历史经验来源。一是系统科学本身的发展,从 1950 年代后期开始,面对越来越复杂的问题,系统动力学、模糊系统理论、软系统方法论、大系统理论、灰色系统理论等流派先后都在探索定性和定量、经验和理论相结合的系统方法。二是中国革命的丰富经验,如毛泽东指挥三大战役的经验,除了没有现代科技的支持、没有电子计算机这样的高技术工具外,他们相当高明地实现了综合

集成。从定性到定量综合集成法的提出还有现实的实践经验作基础，这就是马宾指导、于景元具体负责的“财政补贴、价格、工资综合研究”的成功经验，它直接激发了钱学森的思维系统，由此最初悟出定性与定量相结合的综合集成法的概念。

最后对综合集成法作点评论。就工程技术层次看，从定性到定量综合集成法是一种广泛适用的、操作性很强的具体方法。一项开放复杂巨系统工程的实际任务摆在面前，你就可以严格按照这种方法来操作实施，完成从局部定性认识向整体定量认识的转化，获得工程实践所需要的数据。从定性到定量综合集成法还具有超出工程技术的一般方法论意义。如果不把“从定性到定量”理解成求得工程实际所需要的具体数值，而是指引进数学工具、给基本原理以数学表达，使理论描述数学化，那么，这样的综合集成法也是理论研究的科学方法，从技术科学层次的系统理论到基础科学层次的系统学，都需要也能够使用这种方法。如果再放松要求，不追求描述体系的数学化，理论目标是定性地界定概念，定性地叙述和论证原理、定理、定律，建立逻辑的描述体系，同样要用综合集成法。这就是广泛查阅文献，收集事实、资料、数据、信息，然后拟定适当的逻辑框架，设法把这些事实、资料、数据、信息等逻辑相容地纳入该框架中。钱学森称之为框架法，曾作过多次论证[1,4]。综合集成不可能一次完成，用最初的理论框架去搞综合集成必定会发现种种矛盾、问题、缺失，许多事实、资料、数据、信息填不进去，需要修改框架，再用新框架作新的综合集成，然后再同经验事实比较对照，再修改框架；如此反复进行，使认识逐步逼近客观实际，直到找出一个能够把主要事实、资料、数据、信息都逻辑相容地纳入的框架，即建立起新的理论或学说。一切有价值的学术理论著作都是这样写成的。当然，实践行动的预测决策必须建立在综合集成专家群体认识的基础上，理论创新则不然。理论创新主要是个体劳动，作者个性化的悟性和见识发挥极为重要的作用，不能靠从定性到定量综合集成研讨厅来实施，新理论不能指望专家群体都接受后再拿出来。

参 考 文 献

[1] 钱学森等:《论系统工程(增订本)》,湖南科学技术出版社,1988 年
[2] 钱学森:在上海理工大学系统科学与系统工程研究所成立大会上的讲话,上海系统科学研究院编,2005 年
[3]《马克思恩格斯选集第四卷》,人民出版社,1972 年
[4] 钱学森:《人体科学与当代科学技术发展纵横观》,人民出版社,1996 年
[5] 钱学森:《创建系统学》,山西科学技术出版社,2001 年
[6] P·切克兰德:《系统论的思想与实践》,左晓斯、史然译,华夏出版社,1990 年
[7] 王寿云等:《开放的复杂巨系统》,浙江科学技术出版社,1996 年
[8] 戴汝为主编:《复杂性研究文集(内部资料)》,1999 年
[9] 苗东升:《综合集成法的认识论基础》,《系统辩证学学报》,2003(1)

神经系统复杂性研究中的几个问题

方福康

北京师范大学非平衡系统研究所，北京，100875

20 世纪 80 年代，钱学森先生提出创建思维科学这一新的学科，同时提出的还有系统科学与人体科学，并指出这些新学科，应与原有的学科部门一起形成一个比较完整的科学技术体系[1,2]。钱先生明确提出，思维科学的研究可以分别从宏观的途径和微观的途径进行，宏观途径是传统的心理学方法，微观上则涉及到神经系统和突触的深入研究，将人脑的微观结构及功能与人的思维联系起来，揭示思维的本质。1987 年，钱先生收到了美国人工智能的先驱 H. Simon 的来信，信中谈到，国内所说的思维科学，就是西方的认知科学，钱先生对此未作回应。尽管思维科学与认知科学在内涵和认识上有所歧异，但是，20 年来的发展充分证明了这确实是一门发展迅速、意义重大的新兴学科。

思维科学和认知科学所涉及的对象是自然界中最复杂的大脑神经系统，而所研究的问题涉及人类科学事业的难点，即人类智力的产生。认知科学研究的内容要广泛一些，不仅包含高级认知活动，还包括更为基础的认知活动如感觉和知觉，揭示从初级认知功能到高级认知功能的转变。而思维科学研究的内容更为集中，它更为关注人脑的高级认知活动特别是智力产生和逻辑思维等。

思维科学和认知科学的研究分别在实验和理论两个方面进行。在实验上，发展了神经生物学实验、脑电脑磁分析、心理学行为实验、电子回路模拟实验等各种实验方法。在理论研究上，曾经经过了几个阶段，最早是 H. Simon 提出的符号主义，把认知和智力的规律看成对离散符号处理和计算，这在本质上是借用了物理学的研究方法。80 年代兴起以分布表征和权重变化为特点的联结主义，这是认知科学在基本理论问题上取得的重要进展，但仍没有很好地揭示认知功能的神经机制。目前从复杂系统的角度研究认知活动是一个比较活跃的领域，它关注认知过程中的自组织行为和涌现机制，是认知科学继联结主义之后的一个重要发展，也有称之为第三阶段的联结主义，研究深化了对智力起源的本质认识。目前在理论研究上已形成了明确的学科“计算神经科学”(computational neuroscience)，已有同名的专业性杂志出版；还有一些名称，如理论神经科学(theoretical neuroscience)、大脑动力学(brain dynamics)、神经科学中的动力系统(dynamic systems in neuroscience)等，名称虽有区别，但内涵是一致的，都是希望通过理论模型和计算的方法，揭示神经系统认知过

程和大脑智力产生的基本规律，并与实验数据进行比较。

本文从我们比较关注的近期理论发展——神经系统复杂性的角度来叙述认知科学和思维科学中的一些问题。文中阐述了神经系统复杂性研究的基本观点和方法，这是本文的第一节。第二和第三节通过两个具体例子，对简单的知觉问题给出了可能的解释。思维和概念的问题更为复杂，目前尚未有深入的讨论，在第四节中给出了我们的观点和可能的讨论方案。

一、神经系统复杂性研究的概念和方法

复杂性研究用于神经系统的认知功能，最早是由 I. Prigogine 提出的[3]，他指出认知和学习时所发生的状态改变是一个自组织过程。Prigogine 学派的重要成员 A. Babloyantz 紧接着明确提出[4]，在复杂的非线性多维系统中存在着一个少维子系统，在这个少维子系统中可以描述脑神经认知功能的基本规律。在此基础上，A. Babloyantz 对大脑中存在的混沌和涌现行为做出了动力学解释，对网络的涌现性质进行了深入研究并且描述了这种自组织网络的回路特征[5]。协同学的创始人 H. Haken 在肯定了 Prigogine 学派和 A. Babloyantz 工作的同时，又在其基础上做了发展，详细讨论了怎样用自组织理论来研究脑的认知功能。H. Haken 指出[6]，学习和模式识别过程是大脑不同状态的跃迁，而这一过程可以利用少维的序参量来刻画，他用自己的理论提出了协同学计算机。T. Kohonen 结合神经网络与自组织理论，用映射的方法，将复杂、多维的大脑微观构造约化为二维的平面结构，并构造出自组织特征映射模型（SOM），在一定程度上解释了语言的特征及其障碍的产生机理[7]。这些理论工作的共同特点是，对复杂神经系统的认知活动进行某种抽象，将具有庞大维数的真实系统投影到少维空间，并在此基础上进行可操作性的分析工作。这些研究在很多方面获得了成功，表明了复杂系统概念和自组织理论是研究神经系统认知活动的很好的工具。但是，这些理论初期的研究与神经生物学的联系还不够紧密，因此对认知功能神经机制的揭示仍不够充分。

近年来，以神经生物学为基础的神经系统复杂性研究也正在发展。Izhikevich 详细分析了作为认知活动基本单元的神经元的动力学性质，对神经元在不同输入下所发生的分叉行为进行了分类，在微观层次上揭示了神经系统复杂行为的非线性动力学机制[8]。Freeman 在嗅觉系统的神经生物学实验基础上，根据嗅觉的生理解剖结构以及嗅觉系统各层次不同神经元集合的电发放特性，建立了一套非线性神经网络模型——K 系列模型，并在对兔的嗅神经电生理信号以及嗅觉皮层的 EEG 信号的模拟中取得了很好的效果[9]。H. Haken 在近期工作中，将其工作推进到以神经生物学为背景的神经元信息传递的层面，用复杂性研究方法建立了一组能描述神经元中信息传递、分解与同步的数学方程，较好地反映了复杂系统中的基本特征[10,11]。

Santa Fe 研究所近期组织了以认知神经科学为主题的专项。这些研究从不同的角度阐述了神经系统复杂性的某些方面,但是,一个完整的、清晰的阐明认知和思维的理论体系仍有待于发展与形成。

按照复杂性的观点,大脑智力的形成,是一系列涌现的结果。从神经元突触开始,经神经元群,神经网络,到大脑皮层和整个脑区,经过多层次的涌现,使认知过程不断发生质的飞跃和突变,呈现出知觉、学习、记忆、识别、联想等脑功能,形成了脑的智力。复杂性的研究给出了涌现现象的恰当描述,即自组织和吸引子(attractors)。所涉及的不动点、极限环、准周期和混沌等概念,给出了涌现现象的丰富内涵。非线性动力学、分支、分形、Multi-agent 系统、随机方程等数学表述和计算机模拟,使涌现的计算得以实现。

认知过程是一个涌现过程。根据神经科学的研究结果,突触的信息传递及其性质的变化提供了一个学习和记忆的心理学本源[12],认知过程在本质上是基于神经元和突触的微观动力学的一种宏观行为。由此引出的一个关键科学问题:宏观认知功能如感觉知觉及概念等是如何通过神经元群突触变化来完成的? 事实上,即使单个神经元的电活动可以表示外界的某个刺激,单个神经元的脉冲和突触的可塑性也不构成宏观意义上的认知过程,只有大量的神经元通过突触形成具有各种复杂连接的网络后,整个复杂网络的动力学过程才可能呈现出单个神经元和突触所不具有的全新的复杂行为,例如功能分区、协同振荡、同步发放等空间和时间结构,从而具有脑的认知功能。因此,宏观上脑的认知功能一定是从微观上的神经元和突触变化中涌现出来的,涌现机制的研究将是认知和思维研究的一个基本的切入点。

在神经系统中诸多涌现现象中,知觉(perception)的出现和概念(conception)的形成是两个颇为值得关注的环节。大脑在接收到外界信号以后,首先需要知觉外界信号,神经系统中的知觉涉及外界信号的输入、传递和整合的复杂涌现过程。目前,知觉层次上的认知过程已有较多的研究,并获得许多有用的结论,这些工作将为知觉层次上的涌现机制研究提供基础。概念的形成是大脑中信息更高层次的整合,是思维的关键环节,但对概念层次的认知过程却少有涉及,这个层次的涌现机制不同于知觉层次。大脑是如何从具体对象的信息中获取抽象概念? 如何对概念进行存储和提取的? 可能存在全新的机制。概念的形成是一种由具体到抽象的涌现过程,正是概念的产生、形成,以及其后续的展开,使我们成为具有思维的高等智力的人类。这是现代认知神经科学需要解决的重大问题,这一问题的探讨可望对脑复杂性有更深入的认识。

涌现机制的理论研究方法可以采用三种途径。第一种途径是非线性动力系统的途径,即通过建立非线性动力学方程,分析神经系统的基本涌现机制。从动力系统的角度来看,神经系统处于特定的吸引子状态,系统与外界相互作用使得神经系统可能从一种吸引子状态转换到另一种吸引子状态。寻找认知过程中的低维吸引

子，研究其性质、特征及其转化规律，将从理论上加深对认知涌现机制的认识。第二种途径是联结主义的途径，将神经元和突触抽象成网络中的节点和连接，并用权重变化来模拟突触变化。这一方法能够更充分地反映神经元群组成的网络结构对认知功能的核心作用，部分地再现脑的学习功能，但是，它较少地关注神经元或突触的动力学性质，因此在描述真实神经系统的自组织、非线性、突变等涌现机制研究方面，还有待于进一步发展。第三种途径是多个体模拟(Multi-agent)的途径。应用J. Holland提出的CAS(Complex Adaptive System)理论，神经系统可以看作具有自适应能力的复杂系统，神经元是活动的主体，当它按照某种简单规则进行活动时，所有神经元组成的神经系统就将具有某种宏观上的功能，这种简单规则可以从实际神经元活动和突触变化的规则中抽象出来。把多个体模拟的方法应用到大脑可塑性、大脑发育、概念形成等一系列问题中，应该是今后一个有利的研究方向。当然，这三种途径并不是截然分开的，这些方法的融合互补可能才是解决问题的最有效途径。

神经系统的理论模型可以与实验数据进行比较，比较的范围包括：神经生物学实验、脑电脑磁分析、心理学行为实验、电子回路模拟实验四个方面。近年来，脑成像领域的诞生使人类有史以来第一次能够直接“看到”大脑的认知活动，即大脑在进行各种认知活动时相应的功能定位和动态过程。通过磁共振成像(MRI)、正电子发射射线断层成像(PET)、高分辨率脑磁图(MEG)和高分辨率的脑电图(EEG)等方法，我们可以看到认知过程中大脑活动模式，找到与认知活动有关的关键脑区，进而可以对神经元和突触在认知活动中的机制作进一步研究。除此之外，神经生理学实验、心理学实验、类神经芯片等都取得了很大进展。结合这些实验，将有可能在微观突触机制与高级认知过程之间建立起桥梁，从整体上把握大脑认知功能的涌现机制。

我们下面将结合两个具体认知过程案例的研究，进一步阐述神经系统的涌现机制及其研究思路。

二、声音识别的基本神经回路

随着实验研究的不断发展，我们已经可以通过不同层次的实验来观测大脑完成高级认知功能时的活动情况，包括神经生物学实验、脑电图脑磁图、心理学行为实验等。这些实验的对象都是真实的神经系统，通过直接观测真实神经系统的微观和宏观行为，可以了解到神经系统是如何完成各种认知功能的。另一方面的实验是通过制造大脑芯片来再现真实神经系统的功能，并已取得巨大突破。2003年，世界上第一个能够代替大脑“海马体”完成部分功能的大脑芯片(brain chip)问世了。这是世界上第一个能够植入并代替大脑完成部分高级功能的电子芯片，由美国南加州大学(USC)的T. Berger等人研制开发，并在活体小白鼠上实验成功[13]。该工作参与了

美国2002年开展的对脑功能和新型神经计算机的研究(Mind-Machine Merger)计划,在包括MIT、Caltech、USC等美国九家参与项目的大学中,其工作被认为是做得最出色的,同时也被中国科学界评选为2003年世界十大科技进展之一。

从物理学的角度来看,这项工作更是具有相当大的意义。不同于用神经网络模拟神经系统的方法,大脑芯片采用实实在在的电子元器件重建了神经回路,并制成电子芯片植入脑神经系统使之代替真实神经回路完成功能。有了这种方法,我们就可以通过电子芯片研究真实神经回路接收、处理、发放信号的过程,这是神经系统高级功能研究上的一个很大的突破,也使进一步的理论分析有了更大的空间和意义。

当然,能够完成高级功能的大脑芯片需要的回路系统非常庞大,但所幸的是,这个庞大的电子回路具有一个基本的核心回路,由11个神经元以及30个突触构成,该回路包含了芯片中的主要动力学以及学习规则[14, 15],并可独立放入芯片中完成简单的功能。这是一个庞大的芯片系统,虽然其核心回路的复杂度及容量已经降低了许多,但仍然可以完成一些高级功能,说明其中包含了芯片最基本的机制,这也是我们理论研究的意义所在。当然,作为一个非线性动力系统,即使是11个神经元的回路也比单个神经元复杂得多,但通过复杂性研究的方法,我们已经可以分析其中的一些基本机制了。

南加州大学已经利用这个核心回路开发出了称为Speech Recognition System(SRS)的声音识别系统,将不同人说的单词输入该动态突触神经网络,训练该神经网络,使其提高相同词的输出模式的相关性,降低不同词的输出模式的相关性。结果表明,经过训练以后,对于不同人所说的相同词,输出神经元能够产生相关性很高的时间模式,即尽管不同人说的同一个词的声音波形差异很大,但是,它们之间存在一些共同特征,经过训练的动态突触神经网络能够将蕴含在输入信号时间模式中的共同特征提取出来。

11个神经元构成的回路就能够进行声音信息处理并实现识别功能,这再一次表明了认知过程实际上受到某种基本机制的支配,并且有理由相信,这个核心回路提取了这一基本机制中的关键变量和参量。这为我们提供了启示,由于大脑包含约1000亿个神经元,神经元通过突触连接构成一个庞大的复杂网络,如果直接对这么大的复杂网络进行分析不仅在数学上是难以成功的,也很难揭示大脑学习和记忆的基本规律。该回路将真实神经系统投影到一个少维的子系统,抽象提取出一个小的回路,这个小回路在一些基本动力方程的作用下具有真实大脑学习和记忆的某部分功能,这一研究途径有助于发掘神经系统认知活动的基本规律。

该回路的宏观认知功能是通过微观层次上的神经元和突触变化来实现的,从复杂性研究的角度来看,这是一个涌现过程,并且这个涌现过程基于回路中的非线性动力学机制。那么,究竟回路的动力学产生涌现的基本机制是怎样的呢?我们以复杂性研究为基础对此进行了定量的分析。

我们首先分析回路的动力学结构:该回路共分两层(见图 1),输入层有 5 个神经元,输出层有 5 个神经元和 1 个中间神经元。每一个输入层神经元都与所有的输出层神经元以及中间神经元连接,且中间神经元对输入神经元有反馈作用。两层神经元之间是由动力学突触相连接,突触由相同的动力学方程描述,但方程的参数不同且可以变化,因此每一个突触都具有不同的特性(见图 2)。图 2 实际上给出的是一个内禀的非线性系统,在外界输入的影响下改变系统自身状态,反映了用复杂性研究讨论神经系统认知功能的基本观点。从非线性动力学的角度,该回路的信息处理过程中具有一系列非线性机制:首先,引起递质释放的电位(Pr)是由四个动力学因素组成的,即动作电位(Ap),第一组分易化(F_1)和第二组分易化(F_1),反馈调节(Mod);其次,电位引起递质释放具有阈值机制;第三,中间神经元对于每一个突触前都有一个反馈机制,由变量 Mod 来表示;另外,模型的训练中用了 Hebb 学习法则。这些机制都是非线性动力系统产生涌现的基本元素。

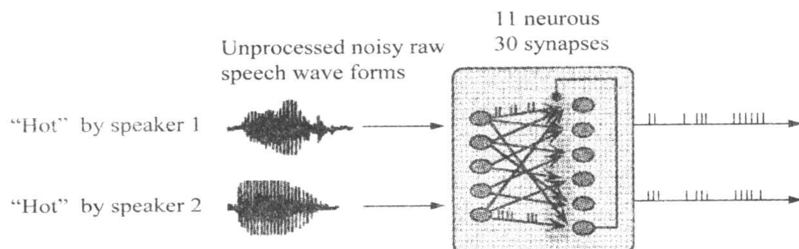


图 1

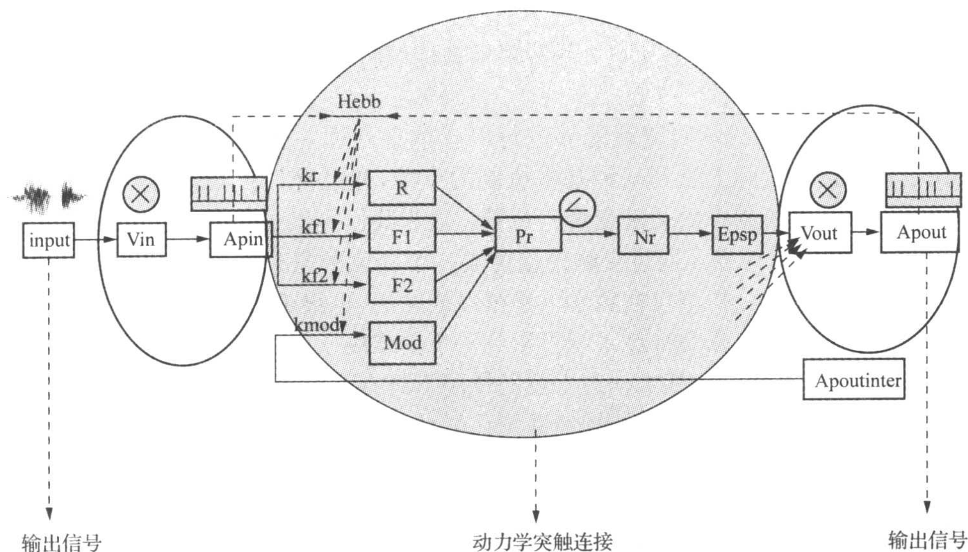


图 2

我们对回路进行了模拟，用声音时间序列作为输入信号，对回路学习过程中各个环节的功能、参数的选择、回路中的反馈与阈值变化以及参数调整的作用等具体问题进行了分析，初步获得了以下一些结论：

1. 回路中存在着引起非线性系统状态改变的关键参量。在模拟分析中我们发现，每个突触上的参数“k”是该神经回路中的关键参量。回路的“学习”过程是通过反馈学习机制(Hebb 学习法则)调整 30 个突触上 120 个参数“k”来完成。k 的变化影响 Pr 的幅值，如果变化到阈值以下，则该突触传递不发生(相当于突触连接断开)。因此，每个突触上的 k 是回路的关键变量，k 的调整最终决定该突触连接还是断开(功能性连接)[见图 3]。

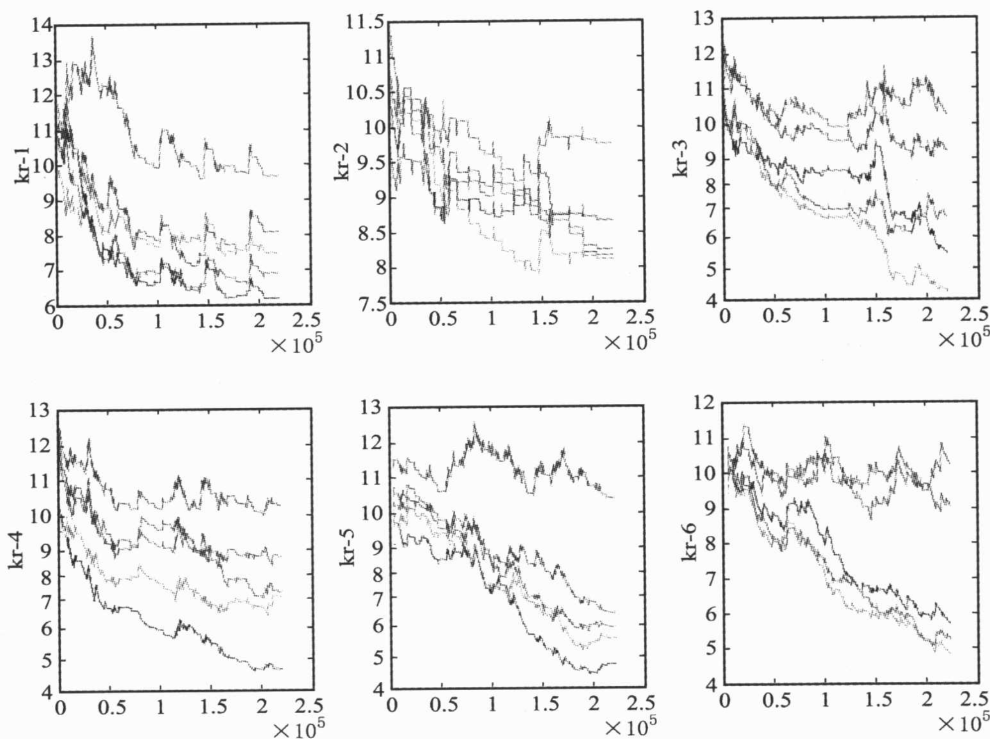


图 3

2. 回路中存在着微观参量影响宏观功能的机制。由于 k 的变化会改变神经递质发放的时间，进而会影响输出神经元发放动作电位的时间结构，这样回路整体输出的时间结构就会发生改变，这将使输出信号的相关性提高成为可能。

3. 此神经回路呈现出学习功能。当学习结束时，虽然 k 没有达到一个稳定的状态，但每个突触上的“Pr 是否超过阈值”将达到一个稳定的状态，所以整个回路的

突触连接状态形成一个稳定的空间结构。每一组词都对应一组突触连接结构。不同组的词对应的突触连接结构不同。这表明,输入时间序列信号的信息通过突触连接的空间结构记录下来了,这一结论与已有的研究结果一致[16,17]。

进一步,可以分析 Hebb 学习法则是如何调整参数 k,以使其按照特定方向演化的,并分析这个过程中的吸引子转变,深入阐述动态突触神经网络认知功能的非线性动力学机制。我们相信,对于该动力学模型的深入分析,必将加深对大脑信息处理的认识。

三、视觉过程中的局部认知与整体认知

神经系统认知功能首先是通过感觉器官对外界信号完成知觉(perception)功能,然后在感觉和知觉的基础上,对神经系统中获得的信号作进一步的处理,因此,信号的感知是认知功能的基础。关于神经系统的感知过程,有一些基本问题,如在感知过程中,微观的突触及其变化是如何起作用的?不同通道获得的知觉信息是如何整合到一起的?知觉信息的整合模式是局部知觉整合还是模糊整体整合?对于最后一个问题存在很多争论,特别是在图像识别问题中的信息整合问题,即图像识别是从局部特征整合为整体图像的,还是从模糊的整体图像中整合出清晰的整体图像的?D. D. Lee 等认为,识别过程开始于对物体的特征性质或简单组成部分的分析,是从局部到整体(from local to global)的认知过程,并且有生理学和心理学的证据[18];而另一些科学家则认为,识别过程开始于物体的整体性的知觉,是整体到局部(from global to local)的认知过程[19,20]。复杂性研究和自组织理论的研究指出,无论大脑具体采用何种模式进行运作,知觉整合过程的本质都是突变和涌现。因此,对图像识别整合模式的研究有助于探讨神经系统认知过程中的涌现机制。

我们以汉字字形感知为对象,对大脑的局部知觉和整体知觉进行了模拟。汉字学习是研究图像识别的一个很好的案例,我们将汉字字形看作特殊的图形,以突触动力学为基础建立了一个三层的神经网络模型,对不同的初始化条件进行了模拟,重现了上述两种认知模式,说明在汉字字形学习过程中,从局部到整体和整体涌现这两种自组织涌现机制都有可能,会随着条件不同或者感知对象的不同而采用不同的感知方式。

汉字字形的学习分为两个阶段:由不认识到认识局部的过程;由各个局部整合成完整字形的过程。模型由三层神经网络组成,输入层是汉字字形点阵,用 x 表示,大小为 40×40。输出层 1 记为 ^1y,由 4 个和输入层同样大小的感受野组成,记为 $RF_1 \sim RF_4$,输入层的每一个点和每个感受野的对应的点相连接,权重矩阵记为 $^1W_1 \sim {}^1W_4$。输出层 2 记为 ^2y,是 40×40 的点阵,其上的每个点分别和 ^1y 上每个感受野的对应点相连,连接权重为 $^2W_1 \sim {}^2W_4$。输出层 1 包含 4 个神经元,反映对于汉

字学习是由多个神经元共同完成的，神经元群的作用是提取汉字的部分特征，实现汉字的局部学习。输出层 2 的作用是把输出层 1 的局部学习结果整合成完整的汉字。神经网络结构见图 4。

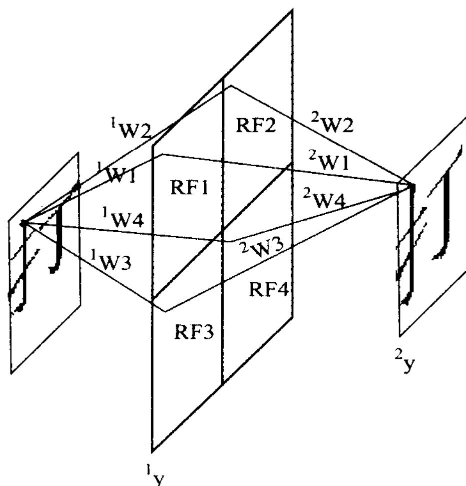


图 4　三层网络的结构图。表示了 40*40 点阵中的一个点的通路。

以上网络连接的特点是每个输入层的神经元经过 1 分为 4 与和 4 为 1 的两个过程。这种结构和连接方式体现了神经元时空编码的特点，一个神经元可以对不同位置的其他神经元输入，同时也可以接收来自不同位置的神经元的输出。

学习过程是权重调节的过程，第一、二层之间的权重采取 pseudo-Hebb 学习法则。当给定输入 x，感受野 i 在 t 时刻的输出和权重调整可以通过下式计算：

$$\begin{cases} {}^1\theta_i(t)=\min\{{}^1c_i(t-1),\dots,{}^1c_i(t-h)\}+0.2\cdot(\max\{{}^1c_i(t-1),\dots,{}^1c_i(t-h)\}- \\ \qquad \min\{{}^1c_i(t-1),\dots,{}^1c_i(t-h)\}) \\ {}^1c_i(t)={}^1W_i(t)\cdot x-{}^1\theta_i(t) \\ {}^1y_i(t)=\tanh({}^1c_i(t)) \quad \text{当}\ {}^1c_i(t)\geqslant 0; \quad {}^1y_i(t)=0 \quad \text{当}\ {}^1c_i(t)<0 \\ {}^1w_{imn}(t)={}^1w_{imn}(t-1)+\eta\cdot({}^1y_i(t)\cdot x_{mn}\cdot{}^1w_{imn}(0)-{}^1y_i^2(t)\cdot{}^1w_{imn}(t)) \end{cases}$$

其中，上角标 1 为层指标，下标 i 表示感受野，阈值 θ 是历史相关的，h 为历史长度，权重 W 和输入 x 的内积如果大于阈值 θ，则输出 y 大于 0，否则 y 等于 0。训练的过程和学习类似，就是重复的输入汉字。每输入一次汉字，网络的权重要按照上述方程进行调整一次，直到输出 ${}^2y$ 到达一个稳定态。

考虑初始权重为高斯分布的情况。权重的空间分布反映的是神经系统中感受野对汉字的不同部位敏感程度。有汉字学习经验的人会把汉字分解成几个相对独立的部分，分别感知每个部分和其位置，再把这些部分整合成一个整体。设定好网络初始状态以后，输入汉字“打”，经过 20 次的学习，可得图 5 所示的结果。

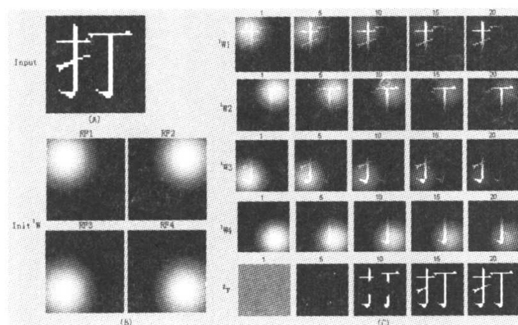


图 5　权重高斯分布的初始条件下训练的结果。

(A)为输入；(B)四个感受野的初始权重；

(C)训练的过程中^1W 和^2y 的变化过程，数字为学习的次数。

考虑初始权重为随机分布的情况。不同的感受野学习整个汉字，但是所感知的细节不同，可以采用随机分布的形式来表示。设定好网络初始状态以后，输入汉字“打”，经过 20 次学习，可得图 6 的结果。

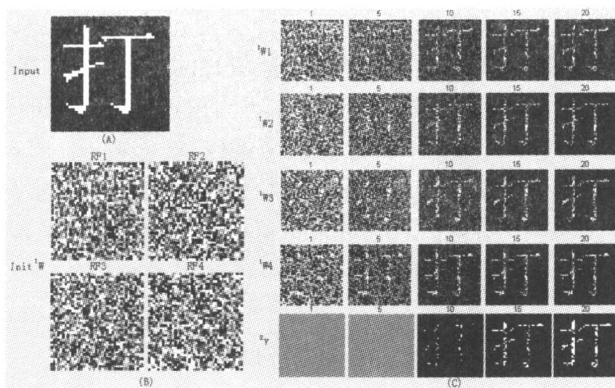


图 6　在权重随机分布的初始条件下的训练结果。

(A)为输入；(B)四个感受野的初始权重；

(C)训练的过程中^1W 和^2y 的变化过程，数字为学习的次数。

由图 6 的结果可见，在相同的参数条件下，初始权重的分布方式可导致学习效果的差异，高斯分布的学习效果好于随机分布。在随机分布的条件下，经过更多次数的学习，也可以达到比较好的效果，见图 7。

根据以上研究结果，我们对汉字学习过程中的自组织有了初步的认识：

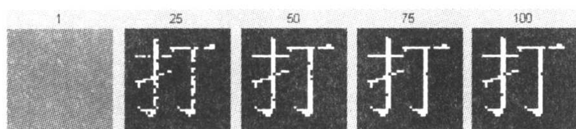


图 7　随机分布的初始条件下，训练 100 次的结果

(1) 在两种汉字学习模式中，都存在着自组织涌现过程，并且涌现过程分为两个阶段。第一个阶段是感受野习得局部汉字或者整体轮廓的过程，第二个阶段是把局部或轮廓整合成完整清晰汉字的过程，涌现的核心机制是 Hebb 学习法和整合法则。

(2) 用上述汉字的认知过程展示视觉的形成，我们的模型分别展示了局部到整体和整体到局部的识别过程，即在一定条件下，识别过程是从局部识别到整体整合完成的，而在另一些条件下是从模糊识别到清晰识别完成的。

关于大脑中的识别过程是否是从局部识别到整体识别，还是从模糊整体到清晰整体的识别。我们的模拟说明了这两种视觉形成过程都有可能，只是概率不同的区别。这可以从以下方面来理解：首先，在大脑中，神经元或突触是存在不同类型的，从而有不同的感受野和权重分布，这种分布是与神经元的类型和经验有关的。其次，认知对象对神经元和突触的刺激是有区别的，即触发的概率会有不同。再次，是认知环境的不同，例如在对象距离较远时，可能是一种模糊感知方式，而在距离较近时，则可能采用局部识别的方式。因此，尽管我们是通过神经网络模型模拟来探讨汉字学习的，但其中的基本机制可能对应着大脑中实际发生过程的基本性质。

尽管对这两种观点尚无定论，但这两种观点都分别被应用到各种研究中，并反过来促进脑认知功能的研究。在图像的计算机信息处理过程中，一般采用局部到整体的方法，将图像分解成不同的组成部分，这一点与联结主义是一致的。如用自组织映射方法处理汉字识别问题时，大脑将抽取汉字特征并分别存储，提取时再把各部分组合在一起，这是一种既节省存储空间又有效率的方法[21]。Daniel 利用非负矩阵的分解方法，将图像分解成一些基本的元构件，这些元构件能够进行快速有效的整合，这实际上是对局部信息处理有效性的一种支持[22]。

另外，关于“两可图”的研究应是展示了从模糊整体图像中整合出清晰整体的识别过程的一个例子。H. Haken 用复杂性的方法研究了图像识别，用序参量和役使原理对识别整合的突变和涌现过程进行很好的刻画和解释：初始的局部特征可以形成相应的序参量，由役使原理得出，获胜的序参量最终决定系统的整体图样[6]。“两可图”识别过程中的序参量完全对称，最终耦合方程的解显示出系统具有明显的振荡现象，与实验观察到的识别振荡即“两可图”完全一致。“两可图”的成功模拟是对整体信息处理的支持。

四、概念的形成

思维科学研究需要阐明智力的产生，而概念的形成正是人类智力起源关键的一步，正是概念的形成及其衍生物，如概念与概念之间的本质联系——规律，概念的存储与提取——联想记忆等高级思维活动，使我们发展成为具有高等智力的智慧生物——人类[23]。

在人类的进化史中，概念的形成是一个长期的复杂的事件，其中经历了多次突变过程，每次突变都被基因保留下来，形成了概念产生的遗传基础。而概念形成在个人的智力发展中也是一个长期的过程，至少需要几年时间来完成。皮亚杰型实验表明，对成年人来说是很基本的物理性质和关系的理解并不是儿童的概念能力所能完成的，成年人看上去觉得不可思议的自相矛盾的陈述对儿童来说可以完美地接受[24]。这说明成年人比儿童具有更完善的概念系统，而儿童的概念模式是对可接受的叙述的压缩和再组织。假设儿童没有成人那样的知识范围和深度，当这个叙述从成年人的角度看是不可能的时候，对于孩子如何理解的合理解释就是他们集中了叙述中提到的概念元素，将其放到最简单的连贯的整体中去，无论这些元素是否为成年人理解。与形成成年人概念知识的高度复杂性相比，孩子的相对简单的概念表达可以更自由地组合。

我们认为，在人类的概念形成和事物认知活动中，外界的输入信息首先经过感受器到达初步处理神经信息的区域，在这些脑区中，信息处理主要有两个步骤，一是外界刺激信号进入皮层的过程，主要是其他信号转变为电信号的过程；二是皮层内部对电信号的处理，经过整合形成人所能理解的信息，这主要是电信号之间的转换。然后整合过的信息才被传入到处理高级认知活动的脑区，进行进一步的加工处理，从而能够实现学习、记忆等高级神经活动。所以，对于概念的研究不同于感知层次上的研究。在感知层次上研究的问题是，大脑如何将感受到的刺激转化为电脉冲信号并进行数据信息的整合。但是，在大脑进行各种高级认知活动时，大脑的反应速度都如此之快，这表明在大脑中进行处理的不仅是具体的数据信息，很有可能是某些抽象的概念。概念的形成要经过对信号的压缩、过滤等程序，是一种由具体到抽象、由简单到复杂的涌现过程。大脑如何从具体对象的信息中获取抽象概念？如何对概念进行存储和提取？这是思维科学需要解决的关键科学问题。

目前对概念的研究主要是在心理学或认知神经科学的行为层次上进行，有两个重要的研究方向：一是结合分类来研究概念，包括已经具有特定概念的被试者如何分类，以及婴儿如何通过给事物分类来形成概念等；二是结合语言的获得，通过语言的学习表现，指出概念的形成是人类获得语言的必要条件。在第一个研究方向上，我们必须认识到概念形成与物体分类虽然有很密切的关联，但实际上是两个不同的

过程。分类是将一些不同的事物按照某种原则归入不同的类别，这些事物的区别可能很大；而概念形成是通过对一类事物的反复学习，从而使大脑得到新的概念，这一类事物一般很相似，具有很多共同的特征，正是这些共同点让它们成为了共有一个概念的一类事物。目前对分类的研究无论是从心理学的各种实验还是理论上各种人工神经网络的模拟，都已经有了一定的成果，科学家们已经知道了行为上分类的规律，也能够通过神经网络实现很好的分类效果，并已经在很多方面广泛应用。但是对于概念形成的研究，尽管已经有了几十年的工作基础，我们还是基本处于所知甚少的阶段，还在探索之中。目前心理学上比较流行的传统观点认为存在最自然物体的分类的基本水平，婴儿开始对事物分类是建立在基础水平上的，即先学会分辨猫和狗，然后再学会分辨生物和非生物[25]。而加利福尼亚大学的 Jean Mandler 的研究对此提出了挑战，她认为婴儿具有两个主要的知识系统：感知系统和概念系统。对感知信息到概念形式的重新描述是创造概念的过程。这种分类重在考察事件的作用，而不是物体的物理出现。两种分类的不同之处是感知分类用来辨识物体，概念分类控制诱导推论。早期概念分类可能是全局的，基于此的诱导归纳也是全局的[26]。

在第二个研究方向即结合语言的研究中，认知语言学家们认为语言投射到抽象概念建立的智力表达系统上。如果真是这样，孩子学习语言就必须具备抽象概念。这说明婴儿在快到一岁的时候就应该具备概念系统了。而对于中国使用汉语的被试者表现中发现，当被试学习了“江”，“河”，“湖”，“海”等汉字之后，发现这些字的左边都有三点水偏旁，就会认为三点水这个偏旁表达了江河湖海的共同特点：水。这说明人类具有自组织地抽象概括的能力，能够主动将事物的共同特点抽取出来并赋以意义，而这种能力至少在儿童学习汉字之前就已经具备了。

在心理学实验研究中，我们发现一些病人具有“概念”缺陷，他们缺乏将具体事物归纳总结为抽象概念的能力，他们只能认知具体事物，例如知道白马、黑马、黄马、红马等各种马，却不能从中抽取出“马”这个概念。该能力的丧失有几种可能性，例如负责感知认识事物的神经元群与负责抽象概括的神经元群的联结出了问题，或者本应具有抽象概括能力的神经元群缺乏这个能力，也可能是在负责认知概念的脑区中某种物质缺乏或过多等等。在对儿童的数学计算能力研究中，实验发现在六岁的儿童中，一部分儿童具有抽象计算的能力，即当问及两个苹果加两个苹果是几个苹果的时候，能够很快回答是四个，而另一些儿童则需要用手指来帮助计算。这说明六岁很可能是儿童形成抽象的数字概念的关键转折时期。

在神经层次上研究概念的形成机制，目前的工作还比较少，理论与实验的结合应该是研究这个问题的一个有效途径。在理论模拟层次上，可以选择适当案例如汉字学习，建立多层非线性神经网络模型，结合心理学行为实验，研究汉字如何与其他信息建立关联如字义在大脑中的形成过程，以及大脑如何在外界刺激下提取与刺激

信息相关的其他信息以形成相对完整的信息集。在实验方面，近年来，脑成像领域的诞生使人类有史以来第一次能够直接“看到”大脑的认知活动，即大脑在进行各种认知活动时相应的功能定位和动态过程。因此，可以通过磁共振成像（MRI）、正电子发射射线断层成像（PET）、高分辨率脑磁图（MEG）和高分辨率的脑电图（EEG）等方法，观察病人与正常人在提取“概念”过程中大脑活动的区别，找到与概念形成有关的关键脑区，进而可以对神经元和突触在概念形成中的机制作进一步研究。

我们认为，概念形成的动力学本质就是涌现，大脑接收到的外界信息是表面化的复杂多样的，将这些具体信息的内涵抽取出来并整合为抽象的概念的过程就是一个涌现的过程，在这个过程中，概念是从无到有经过自组织产生出来的，这是我们人类之所以成为高等智慧生物的关键所在。在这个涌现的过程中，概念的形成最终会到达吸引子所在的稳定态，这个吸引子的形式和稳定性是我们研究的目的之一。在目前的动力学理论中，吸引子有不动点、极限环、准周期行为和混沌等几种，代表概念形成的吸引子可能是上述传统吸引子中的一种或其组合，也可能是一种新的未知的尚待我们发掘的吸引子，它可能具有的形式和行为吸引着我们。在概念形成的过程中，吸引子可能不止一种，最后可能到达的稳定态也可能不止一处，根据不同的初始状态、过程参数和外界环境影响，以及概念本身的性质所致，概念的形成可能会通过不同的道路来完成，也就是具有多种概念形成模式，不同的概念形成模式会引导过程到达不同的稳定态。这也就解释了为什么人类概念具有多样性，对同一事物，每个人形成的概念为什么会有一定的差别。

Jerry Fodor 提出在概念形成过程中具有两个中心概念，即存储和压缩，他认为大脑会将外界输入的物体信息作一定压缩，信息压缩是概念形成的第一步[27]。我们也认为由于外界输入的信息非常庞杂，为了大脑能够快速准确地识别事物，信息应当经历了一个压缩的过程，减少大脑处理信息的绝对量，但是必须以保证识别事物的基本必要信息为前提。所以我们试图寻找合适的压缩算子和神经网络结构来模拟概念形成的过程。我们希望这个压缩算子能够快速准确地剔除信息中的冗余，同时保留对于事物识别有用的信息，这个任务可以由一个或几个神经元群来完成，信息经过一个神经元群，就经过一次压缩，几次反复操作后，信息的绝对量与初始值相比可能是微不足道，但是却保留了表达物体特征的足够内容。但是目前由于实验方法和条件所限，我们并不知道概念到底是在哪一部分脑区形成的，也就不知道能实现概念形成功能的神经网络具有什么样的基本特征。

圣地亚哥大学的 Fauconnier 和 Turner 等人的概念整合模型（Conceptual Integration Networks）[28]认为在大脑处理概念的过程中，存在多个空间，外界信息首先进入输入空间（input space），再从输入空间投影到整合空间（blend space）进行整合，generic 空间（generic space）映射到每个输入上。定义了当前在它们之间的 cross-space 映射。Generic 空间和整合空间是相关的：整合空间包含 generic 结构，也包含

更明确的结构，包含对于输入来说不可能的结构，整合是不能仅仅从输入的结构预测的。所以他们认为这是一个涌现的过程，整合空间中的三个操作：composition，completion 和 elaboration 之中，后两者导致了整合空间中的涌现结构，使其出现了输入空间中没有的东西。

概念整合最惊人的一幕就是选择投影（selective projection），即投影到整合空间的结构是选择性的。Fauconnier 和 Turner 指出这意味着大脑接受到的外界信息只有一部分能够输入到负责概念的脑区，这些信息在整体输入中的比例可能很小，比如我们看到一只猫在跳跃，我们只会注意它跳跃的大致轨迹，而不是精确尺度。做到选择投影的神经认知的一种可能因素是抑制（inhibition）。例如，对应视觉区域在相同点开始但不同方向的神经元之间存在抑制联结——一个神经元的强度增加，周围细胞的活动能力就会减弱[29]。该机制在视觉模式识别中起了很大作用——如果视觉系统的子结构探测了一个特定的方向，那么就不能同时在该点记录另一个不同的方向。一个关于选择投影的神经基础的假设是，当视觉表达的一些因素（对应一个输入空间）被激活时，其他的就被抑制，可能是因为它们表达的因素在某种意义上是互相冲突的，激活较强的特征输入到整合空间。我们认为在概念形成中很可能也有选择投影过程。因为一个事物具有多重特征，这些特征都可能被我们的感官所接收，化为电信号传递到皮层。但是这些特征对于判断该事物的名称及属性来说信息太多了，过多的冗余信息加重了大脑的工作量，可能会影响到处理信息的速度和准确性。这时候特征选择——将判断事物的必需且足够的信息选择出来，过滤掉多余的信息——就是必要且明智的。我们希望通过有效的选择算子或者突触权重处理，能够实现特征选择过程。目前已有多种特征选择方法，例如 branch and bound algorithm，sequential floating search，beam search，Las Vegas Filter approach 等等。但是这些算法都有一定缺陷，主要是搜索量过大，需要的时间过长，并不符合神经层次处理信息的速度要求，应用的范围是分类而不是概念的研究上。我们希望对已有的算法加以借鉴，力争找到一种合理有效能够运用在概念形成过程中的方法。

除了上述对于概念本身的研究之外，有些工作还在研究已经具备了概念之后，如何通过概念的组合和转换来得到新的概念，也就是人们对于新事物的理解和接受的问题。还有大脑能产生新的完全不同于过去的概念，而不仅仅是对旧有概念进行组合的问题，这是想解释人类创新能力的问题。目前有很多工作重点集中于对联想记忆的研究，该过程就是在概念基础上进行的思维活动，它所处理的信息不是简单的数据，而是某种抽象的概念。联想记忆过程就是从一个记忆事项的一部分联想地回忆到全体，又从一个记忆事项联想地回忆到其他记忆事项[10,11]，在这个过程中，记忆事项就是以概念的形式存储并处理的，联想记忆就是当外界刺激输入大脑以后，与大脑中已有的概念联合起来做出相应的反应，及时调动出相关的概念。人的思维抉择也是以概念为基础的，是在现存概念集的基础上，面对外部一种新的刺激时，将

根据已有的概念和对方的决策来作出响应，这是一个多层次的涌现过程。

我们相信，将大脑作为一个复杂系统来研究，研究神经系统认知功能中的涌现机制，包括知觉过程和概念形成中的涌现机制，必将为今后认知过程的讨论提供新的方向。

参考文献

[1] 钱学森：系统科学、思维科学和人体科学，《自然杂志》，1981，1

[2] 钱学森等：《关于思维科学》，上海，上海人民出版社，1986 年

[3] Prigogine I.，Laws of Nature and Human Conduct：Specificities and Unifying Themes. The Proceedings of Conference on Laws of Nature and Human Conduct，Belgium，1985

[4] Babloyantz A.，Molecules，Dynamics，and Life. An Introduction to the Self-Organization of Matter，Wiley，New York，1986

[5] Babloyantz A.，Self-Organization，Emerging Properties，and Learning，NATO ASI Series B：physics，Plenum Press：New York and London，1991

[6] Haken H.，Principles of Brain Functioning：A Synergetic Approach to Brain Activity，Behavior and Cognition. Berlin：Springer，1996

[7] Kohonen T.，The Self-Organizing Map，Springer-Verlag，2nd edition，1997

[8] Izhikevich E M.，Dynamical Systems in Neuroscience：The Geometry of Excitability and Bursting，MIT press，in press，2006

[9] Freeman W J.，Kozma R. Biocomplexity：adaptive behavior in complex stochastic dynamic systems. Biosystems，2001，59

[10] Haken，Synergetic computers and cognition. Springer，2004

[11] Haken H.，Brain Dynamics：Synchronization and Activity Pattern in Pulse-Couples Neural Nets with Delays and noise，Berlin，Springer，2002

[12] Abbott L F，Regehr W G，Synaptic computation，Nature，2004，431

[13] Throdore W. Berger et al.，Brain-implantable biomimetic electronics as the next era in neural prosthetics. Proceedings of the IEEE，2001，89(7)

[14] Liaw J S，Berger T W，Dynamic Synapse：A New Concept of Neural Representation and Computation. Hippocampus，1996，6

[15] Liaw J S，Berger T W.，Dynamic synapse：Harnessing the computing power of synaptic dynamics. Neurocomputing，1999，26-27

[16] Markram H，Tsodyks M，Redistribution of synaptic efficacy between neocortical pyramidal neurons，Nature，1996，382

[17] Shon A P，Rao R P N. Temporal Sequence Learning With Dynamic Synapses，UW CSE Technical Report，02-07-03

[18] Lee D D，Chun M. M.，What are the units of visual short-term memory，objects or spatial locations? Perception & Psychophysics，2001，63

[19] Chen L, et al. , Global perception in small brains: topological pattern recognition in honey bees, PNAS, 2003, 100(11)

[20] Zhuo Y, et al. , Contributions of the Visual Ventral Pathway to Long-Range Apparent Motion. science, 2003, 299(17)

[21] Kohonen T. , Self-Organizing Maps, Springer, Extended Edition, 2001

[22] Daniel D L. , Seung H. S. , Learning the parts of objects by non-negative matrix factorization, Nature, 1999, 401(21)

[23] 朱智贤,林崇德:《思维发展心理学》北京,北京师范大学出版社,1986 年

[24] Subbotsky, Eugene, Early rationality and magical thinking in preschoolers: Space and time. British Journal of Developmental Psychology, 1994, 12

[25] Rosch, E, Principles of categorization. In E. Rosch & B. Lloyd (Eds.), Cognition and categorization, Hillsdale, NJ: Erlbaum, 1978

[26] Jean Mandler, The foundations of mind: origins of conceptual thought. Oxford University Press, 2004

[27] Jerry Fodor, Modularity of mind。MIT Press, 1983

[28] Faucounier, Gilles and Mark Turner, Conceptual integration networks, Cognitive Science, 1998, 22 (2)

[29] Sillito, A. M, Inhibitory mechanisms influencing complex cell orientation selectivity and their modification at high resting discharge, Journal of Physiology, 1979, 289

关于科学与艺术的螺旋式推进发展的思考*

王浣尘

上海交通大学安泰经济与管理学院，上海，200052

一、引　言

人类的活动离不开物料、能量、信息三要素，人类财富的获得也当然离不开“物能息”三要素。人类获得财富的根本源泉：一是大自然的恩赐；另一是信息的有效增殖，即复制、创新和涌现[7]。这里，复制是指广义复制，创新是指发现发明创造的统称，涌现是指复杂性系统中的涌现，包括开放复杂巨系统综合集成中的涌现，即所谓“1＋1＞2”之意。随着人类活动的不断增强，人类作为一个整体已经意识到：必须“善待大自然的恩赐，崇尚信息的有效增殖”。大自然的恩赐是有一定的限度的，必须大力推进可持续发展和循环经济；人类为了获得更多更大的财富必须在宏观上和微观上同时大力推进信息化。其中，不论从哪一个角度看，创新是核心，创新是关键。

笔者崇尚“创造性是人类的天赋，创新乃是人类的天职。”人类区别于低层次的动物，就在于创新。“创新是一个民族的灵魂”，已经深入人心。

钱老高度重视创新。智慧创造，可简称为“智创”。综合集成思想在智创领域里反映出来的是大成智慧。大成智慧的系统是定性与定量的综合集成，是科学与艺术的综合集成。“量智”偏逻辑思维，“性智”偏形象思维。钱学敏教授[1]充分阐述了这一大成智慧学的真谛，阐发了科学与艺术的关系。钱老对于艺术不单具有特殊的环境和关联，而且又鲜为人知地具有广泛的爱好和相当的天赋，有时在家里还会舒展歌喉，引吭高歌；因此，钱老有着特殊优越的条件得以高瞻远瞩地洞察科学与艺术综合集成的真谛。钱老高度重视创新，不单身体力行，而且长期以来大力鼓励创新和培养创新人才[1]~[5]。钱老身体力行努力实践“智创”，激发“性智量智的互动”，涌现“大成智慧”，促进“科学与艺术的发展与升华”；而又大力鼓励，号召，建议，组织，推动创新；高度重视培养年轻晚辈，致力于教育、指导、信授，直至于亲自面授。

“创新”需要科学与艺术的支撑，“管理”需要科学与艺术的支撑，“系统”需要科

---

* 国家自然科学基金重大项目资助(79990583)

学与艺术的支撑。

二、对科学与艺术的客观需求

(一) 创新对科学与艺术的需求

思维方式,一般可分为两种:逻辑思维和形象思维。在生理上,一个偏左脑,一个偏右脑。科学侧重逻辑思维,艺术侧重形象思维。这里提的“科学”是广义的,既包括定量逻辑,也包括严密的定性逻辑和辩证逻辑;而“艺术”也是广义的,除了文学、戏剧、影视、琴棋诗画等等之外,还可以包括技艺、技巧等在内。如果将思维方式稍微再细分一下,是不是可以分为:严密逻辑式思维,飞翔式思维,跳跃式思维,混合式思维。

1. 严密逻辑式思维

严密逻辑式思维在生理上,偏左脑。其思维的特征是,对任何问题的思考都很严密,有理有据,一丝不苟。典型的代表人物为数学家。在严密的数学思维的训练下,他们在头脑中形成了一种思维框架,有目标,有约束条件,有严密的逻辑推理,一环扣一环,天衣无缝。一旦形成了这样严密逻辑式思维的框架以后也就习惯成自然,不单在科学研究中,而且在日常生活中,都会流露出这种特征。

严密逻辑式思维,既要定性又能定量,思维过程是较为冗长的,也是很累的,但是对于科学研究和创新是很重要的,是必需的。例如,一个新药的研究开发过程,一般加快了的也还需要 3 年以上。又如转基因食品,决不是按照某一个单一目标取得了成功就可以马上端上餐桌供人食用的。

但是,过分的严密推理,创造性往往会受到压抑。

严密逻辑式思维也不适宜到处用。使用的场合不妥当,会闹出笑话的。

2. 飞翔式思维

飞翔式思维在生理上,偏右脑。其思维的特征是:对问题的思考往往天马行空地自由翱翔,无拘无束地野马奔腾。前面的出发点,和后面的结论,旁人无从理解其中的来龙去脉,无法知晓其中的奥妙。典型的代表人物为幻想家、艺术家、诗人等。这些人物,比较感性,容易激动;说起话来往往会得出其不意,一语惊人,颇多真知灼见;做起事来别出心裁,创意不断。这些人物之中有些喜欢自由发挥,漫无边际;在生活上也许有人也会表现出一些自由散漫,不修边幅。

创新离不开飞翔式思维。飞翔式思维,需要宽松的环境,自由的氛围,快乐的心

境。目前，在一些知识型创新型企业中正在推行“快乐管理”的理念，是有其深层次的含义的[8]。

如果只停留在飞翔式思维的层次上，那么飞船还是上不了天的，只不过还是一个“嫦娥奔月”的想象而已。

3. 跳跃式思维

跳跃式思维在生理上，忽偏左脑忽偏右脑。其思维的特征是：对问题的思考，有直觉、顿悟、灵感以及不完整的逻辑思维。直觉，是极快的跳跃。顿悟，是较快而略有时延停顿的跳跃。灵感，是较慢而时延可长可短的跳跃。不完整的逻辑思维，主要是依托定性的逻辑思维框架，在形式上有大前提，小前提，归纳，演绎，推理，分析，综合等，但其带有或大或小的缺陷。典型的代表人物为传统的社会人文科学工作者，传统的经济学家，大学生辩论队中的辩论高手。这些人物，说起话来，头头是道，一句连一句，环环相扣，有时候也会引用一些数据来支持相关的论点。有时候，可能很正确，结论颇多真知灼见；但是并不能保证时时正确，有时候很可能看似天衣无缝，其实经不起严密逻辑的推敲。例如在 1997 年东南亚金融危机的时候，很多经济学家、金融学家相继很快地发表了很多见解。当时有专家统计说，“大家说得很多，有关的危机原因合计起来可能已经有 20 多条，大多不恰当，而真正的主要原因只有 4 条……”

跳跃式思维，很有用，能够很快对现实问题作出反应，能解燃眉之急；也能启迪进一步深入思索研究的方向。

4. 混合式思维

混合式思维在生理上，左右脑并用。其思维的特征是：严密逻辑式、飞翔式、跳跃式等兼收并蓄，混同使用。典型的代表人物为工程师，医生等。例如，某项建筑工程在立项之初，需要一幅幅想象中的“效果图”，配有花草树木、两只小鸟、三朵白云；如果能够获得决策者的赏识，那么接下来就要进入概念设计，……，技术设计，严密计算，工程设计，安全系数，施工设计，施工，监理，……，验收等。又如医生看病：望闻问切，八九不离十；各种现代化机器设备的严密检测，精确可靠；科学解释，晓之以理；语重心长，动之以情；“花言巧语”，安抚情绪，安慰心理。严密、飞翔、跳跃三者混同使用。

显然，对于科学研究之“创新”来说，上述的四种思维方式都有需要。严密是创新之父，飞翔是创新之母，跳跃是创新之机，混合是创新之会。对于系统科学与系统工程来说，是一门横向交叉学科，尤其需要上述的四种思维方式，而且更加需要其“自主式”思维的有序运作，从而“创新”得以“从心所欲而不逾矩”。

涉及思维推进过程中的创新，非常重要的一点是“悟性”。有没有可能“以其昏

昏，使人昭昭”？“科学＋艺术”是一种可能有效的途径，如表1所示。

表1 关于“昏昏”与“昭昭”的悟性

以其 \ 使人	昭昭	昏昏
昏昏	可能吗？ 依托创新，“科学＋艺术”	通常情况？
昭昭	通常情况！	异常情况？

（二）管理对科学与艺术的需求

当今管理学界对管理有一个共识，认为管理是“科学加艺术”[6]。

Joe H. Mize教授在1995年提出，管理学科的发展一百多年来经历了四个“高峰期”时代，笔者将其第四个高峰期“集成企业时代”改写成“综合集成系统时代”，即

（1）1890—1940年，科学管理时代（Scientific Management）；

（2）1930—1980年，运筹学时代（Operations Research）；

（3）1960—2000年，系统工程时代（Systems Engineering）；

（4）1980—20??年，综合集成系统时代（Metasynthetic Systems）。

从这四个高峰期的接替过程可以看出，管理的发展有着孪生的两条发展主线：一是其科学程度在不断增加的过程，二是其处理现实问题的艺术技巧在不断提高的过程。科学成分和艺术成分是管理的两个不可或缺的组成部分。

管理是处理世间有人参与之事物的一类复杂系统，环境千变万化，因素错综复杂，人员千奇百怪，因而管理者既需要深邃的科学知识，又需要高超的艺术运作。因此，管理界对于“科学＋艺术”的判断能够取得共识是势所必然的。

（三）系统对科学与艺术的需求

系统科学与系统工程发展至今，其前沿在开放复杂巨系统，在系统复杂性，需要创建系统学。钱老指出从定性到定量综合集成方法论、综合集成研讨厅是处理开放复杂巨系统的思路和技术[3]。

运用人机结合综合集成体系，正是大成智慧的实现之途。钱学敏教授在前面所引的文章中在提到大成智慧时还引用了钱老在10年前给她信中的一段话，“我用了70年的学习才悟到以上道理，太长了！能不能用不到20年就学到？可以的。用人-机结合，用信息技术，用信息网络。第五次产业革命呵！”这里提到了“人机结合”。大成智慧的实现，固然人-人结合是一种途径，机-机结合也是一种途径，而人-机结合恰恰是大成智慧实现的最佳途径，大大有利于实现新的飞跃。人机结合的大成智

慧，提供了一种可能，有可能使其智慧超过单独“人”的智慧，也可能超过单独“机”的智慧。人-机结合，以人为主，以人为本。人机结合这也是当前国际上前沿科学之一。在涉及社会经济的发展战略和规划的时候，特别要用到人机结合的综合集成体系，包括综合集成研讨厅、综合集成方法论等。这样做有利于战略规划的科学的制订和科学的实施。

钱老特别重视系统学，号召创建“系统学”。1978 年后不久，他提出这一问题，从 1986 年 1 月起，开展“系统学讨论班”活动。钱老指出：“结论就是，创立系统科学的基础理论——系统学已经是时代给我们的任务。”并且强调说“……如果讲一句冒失的话，我觉得系统学的建立，实际上是一次科学革命，它的重要性绝不亚于相对论或者量子力学。”[3]

三、科学与艺术的互动

科学与艺术相结合，理论与实践相结合，将会对创新产生巨大的推动力，如图 1 所示。

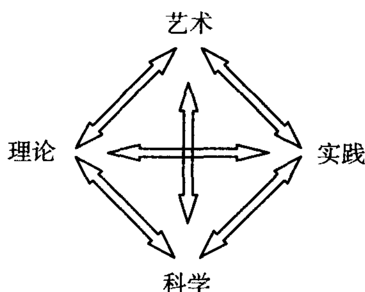


图 1　科学与艺术相结合以及理论与实践相结合的示意图

在科学与艺术相结合的基础上，如果能够进一步加以动态化，将科学与艺术螺旋式地推进起来，对创新必将会产生更为强大的推动作用。

钱老有语：“科学工作是源于形象思维，终于逻辑思维。形象思维是源于艺术，所以科学工作是先艺术，后才是科学。相反，艺术工作必须对事物有个科学认识，然后才是艺术创作。在过去，人们总是只看到后一半，所以把科学和艺术分了家，而其实是分不了家的；科学需要艺术，艺术也需要科学。”这是钱老的话，听了之后，深深感到钱老所处境界很高，这些话真是我们今后研究工作的指针。现在研究社会经济发展战略，也应该“性智”与“量智”相结合，科学与艺术相结合，相互促进。科学需要艺术，艺术也需要科学，特别是搞发展战略特别需要艺术，用形象思维来推动工作，实现综合创新[3]。

在控制论领域里，当 2 个事物有着相互作用，就形成了一个“闭环”，就称之为其中存在着“反馈(feedback)”。在当前社会科学领域里，当多个事物之间存在着相互作用，就称之为其中存在着“互动(interaction)”。反馈与互动，都是闭环性质的作用，是对同类事情的不同称呼。当闭环之中的各个事物有主次之分的时候，用“反馈”较为贴切一些；否则，以“互动”较为妥当。在这里，科学与艺术之间的相互作用，

难分伯仲，因而以称之为“互动”为妥。

例如，管理是“科学＋艺术”，在这个基础上螺旋式地推进起来，在现有的艺术部分的基础上进一步强化科学的成分，可称之为“科学化”，而在现有的科学部分的基础上进一步强化艺术的成分，可称之为“艺术化”。于是，可以构成求解问题的一个闭环，可称之为“科学艺术旋进环”，可简称为“科艺环”，即：艺术→科学化→科学→艺术化→艺术→……，如图2所示。

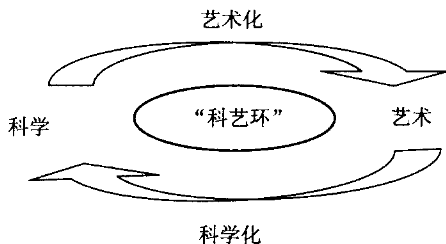


图2 “科学艺术旋进环”的示意图

在实践中，运用这样的“科艺环”，当面临非常困难的问题，有希望能够将其逐步地解决，这就可称为“以旋克难”；当面临事物自身螺旋式发展波浪式前进的问题，也有希望能够将其逐步地解决，这就可称为“以旋克旋”。

螺旋式推进方法论具有相当大的能力。对于这一点，还可以从一个简单的定量关系给出一个初步的说明。比如说，原始方法共有 n 种，按照结合论可以获得派生方法 2^n-1 种，而按照螺旋式推进方法论可以进一步获得派生方法 $\sum_{k=1}^{\infty} 2^{nk}-1$ 种。即使其中有些派生的方法不能用，毕竟可用的派生方法比起原始方法或结合论的派生方法来说肯定会多得多。足见螺旋式推进方法论之能力[9~11]。

四、结　语

科学的发展，需要艺术；艺术的发展，需要科学。创新、管理、系统都需要科学与艺术的互动。凡是复杂而又困难问题的求解也都需要科学与艺术的互动，需要“科艺环”。

在现实中，真正要能实现“科艺环”的科学与艺术的互动，其难度是很大的。由于两者领域跨距太大，个人能耐不够，需要依靠团队力量，采用竞争合作共赢的模式，鼓励创新，推进创新。为了能够实现这一点，还需要有一些条件的保证：一是主观方面的，需要奋发自强，谦虚加勇敢；二是客观环境方面的，需要和谐，切磋加宽容。

环境和谐，主观奋发，学术创新之春天势将洒满中华大地。

参 考 文 献

[1] 钱学敏:《量性双悟智,天人一贯才——科学艺术与钱学森的大成智慧学》,《西安交通大学学报(社会科学版)》,2004年,24(2)

[2] 范敬宜:再闻钱老讲“艺术”(人民时评),《人民日报》,2005.08.01,第五版

[3] 钱学森:《创建系统学》,山西科学技术出版社,2001年

[4] 钱学森:《给姜璐教授的信》,1996年2月1日,姜璐著,《熵——系统科学的基本概念》,沈阳出版社,1997年

[5] 王浣尘:《用钱学森综合集成思想推进科学发展观的科学实践》,《中国科学人》,2004年10月,(总118)

[6] 王浣尘:为发展适应我国国情的管理科学而努力,《中国科学基金》,1989,(3)

[7] 王浣尘:枚系统经济学与可持续发展,《系统工程理论方法应用》,1997,6(1)

[8] ROOFROOT屋脊与根工作室编:创造让员工HAPPY的企业文化,《走进管理时代》,东方出版中心,2003年

[9] 王浣尘:综合集成系统开发的系统方法思考,《系统工程理论方法应用》,2002年3月,11(1):基金重大(79990580)

[10] 王浣尘:《难度自增殖系统及其方法论》,《上海交通大学学报》,1992年,26(5)

[11] 王浣尘:《系统方法论——旋进原则》,《系统工程》,1994年,12(5)

信息的系统观——从系统科学看信息

车宏安

上海理工大学系统科学与系统工程研究所，上海系统科学研究院，上海，200093

信息是当今人们使用得最多最普遍的概念之一，从日常生活到科学技术，无不普遍使用信息这个词。但至今对信息的定义还未取得共识。据说，当前已有一百多种信息的定义[1]，另外，使用"信息学"和"信息科学"的学科，闫学杉已列举出 70 门[2]。在这种情势下，人们希望有一个统一的信息概念是很自然的，研究统一的信息定义有积极的重要意义。

可从两个层面研究普适的信息涵义：思辨的哲学层面和实证层面。本文从后一个层面对信息的共性作一些探讨。

钱学森在 20 世纪 80 年代阐述过对信息的看法。他认为："信息的研究是从通信技术入手的，早在本世纪 40 年代就由美国申农(C. Shannon)提出通信道中信息传递的理论，开始有了信息的准确计量。后来又由于控制论的影响，形成了信息论，把信息的概念大加扩展，成为信息源、信息道和信息受者的统一理论。但对信息的本质似乎还不十分清楚。我以为信息的概念不能脱离由信息源、通道和受者的系统，作为自然科学研究对象，它不过是某种形态的物质运动，当然是物质的；但受者并不对运动的诸如速度、动量和能量感兴趣，而是提取运动所内涵的另一种东西，叫信息。"[3]

钱老的上述观点，是把"信息"和一个普适性的"通信系统"联系在一起，认为信息是"通信系统"的整体功能。本文是关于这方面的认识和体会。

一、信息的通信模型

1. 历史的考察

人类以语声传达自己的状态，是典型的由信源、信道和信宿三要素组成的通信系统，但长期并未明确地意识，直到出现中国古代的烽火台这类事，显示人们不但意识到，而且以这种认识，主动创造出"人工的通信系统"。电报的发明，标志着共用的信号通道的建立，标志着作为信源和信道，以及信宿和信道之间的接口——编码和译码的创生。至此，传递信息的通信系统，其构成要素(信源、编码、信道、译码和信

宿)均被人们自觉认识到了。通过这样的通信系统,信源的性质和状态,可以被信宿反映出来,可以引发出信宿性质和状态的变化。

信息作为信宿反映的信源的性态(性质和状态),是通信系统传递的东西,这种东西并不是通信系统所固有的,是自在于通信系统之外的,但是,又是通信系统所传递的。这一点为人们抽象地认识到,是一个漫长的进程,其标志是 1928 年哈特莱(R. V. L. Hartley)在《贝尔系统电话杂志》上发表了一篇题为"信息传输"的论文,他总结电报通信工程,指出了发信者发送消息的信息数量的大小仅与发信者在字母表中对字母的选择方式有关,而与消息的含义无关。并在此基础上,导出了第一个所谓信息度量的公式

$$I=\log S^n=n\log S。$$

其中,S 是字母表的字母数目,n 是每个消息所含的字母数目。

哈特莱在这篇论文中,把信息理解为选择通信符号的方式,并用选择的自由度来计量这种信息的大小。他认为,发信者所发出的信息,就是他在通信符号表中选择符号的具体方式。例如,假定他从符号表中选择了这样一些符号:"I am well",他就发出了"我平安"的信息;如果他选择了"I am sick"这些符号(包括空隔),他就发出了"我病了"的信息。发信者选择的自由度越大,他所能发出的信息量也就越大。特别是,哈特莱注意到选择的具体物理内容是无关紧要的,重要的是选择的方式。这就是说,不管符号代表的意义是什么,只要符号表的符号数目一定,"字"的长度一定,那么,发信者所能发出的信息的数量就被限定了[4]。

这是认识上转折的飞跃! 从此,信息和传递信息的通信系统就作为既有根本联系,又有本质区别,在科学形态上迅速发展了。我们说的根本联系,是指信息是通信系统传递的"东西";我们说的本质区别,是指信宿的"反映"和信源的"性状",都是独立于通信系统之外的。

作为上述科学形态的信息和传递信息的通信系统,最重要的发展,是 1948 年申农(C. E. Shannon)发表的《通信的数学理论》和维纳(N. Wiener)发表的《控制论:或关于在动物和机器中控制和通信的科学》。

在《通信的数学理论》中,申农接受了哈特莱关于信息的形式化的思想,并把他的信息度量公式推广到更有意义的情形。申农指出:

"通信的基本问题是在消息的一端精确地或近似地复现另一端所挑选的消息。通常,消息是有意义的;那就是说它按照某种关系与某些物质或概念的实体联系起来。通信的语义方面的问题与工程问题是没有关系的。重要的是一个实际的消息是从可能消息的集合中选择出来的。因此系统必须设计得对每一种选择都能工作,而不是只适合工作于某一种选择,因为,在设计时这是不知道的。"

申农紧接着列出了如下通信系统的示意图(图 1):

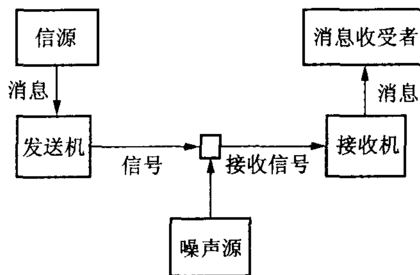


图 1

并清晰具体地描述和定义了信息源、发送机、信道、接收机和消息收受者：

信息源——它产生一个有待传输给接收端的消息或消息序列。

发送机——它是采用某种方法把消息变换为适合于信道上传输的信号。

信道——它是发送机到接收机之间用以传输信号的媒质。

接收机——它通常完成与发送机相反的工作，把信号重新构成消息。

消息收受者——是接受消息的人或物[5]。

申农在以上的阐述中，突出了信息的“语义”和通讯工程无关。从他描述的示意图来说，传递信息的通讯工程系统，实际只包括发送机、信号的通道、接收机。值得特别指出的是，申农既强调了通讯工程和蕴含信息“语义”的“消息”无关，又要能精确传递“消息”，其关键就是发送机能把消息变换为信号，接收机能把信号反变换为消息。而变换和反变换的核心又是所谓“编码”和“译码”。

在这里，申农完成了认识上两点重要的突破：第一，他进一步明确了通信工程与信息的含义无关；第二，通信系统所处理的信息本质上是随机的，因此必须采用非决定论的统计方法来处理问题。这样，他就找到了“形式化”和“概率论”这样的工具，并按照“信息是用来消除不定性的东西”这样一个基本观念，论证了著名的“信息熵”，定义了“信息量”。还进一步导出了信息传输率的表达式、信道容量公式以及在允许一定失真条件下信源的信息率公式。特别有意义的是，利用这些结果，他还得到了关于信息传输的一系列重要的编码定理，揭示了信息传输过程中数量和质量的辩证关系，建立起一些重要的性能界限，从而明确了在一定条件下什么是可以做到的，什么是不可能做到的，指明了人们在通信工程中努力的方向。这样，人类就在历史上第一次如此清晰地认识和把握了通信技术的本质，初步认识和把握了信息及其传递的规律[4]。

维纳在他的名著《控制论：或关于在动物和机器中控制和通信的科学》[6]一书中既阐述了通信系统所传递的东西——信息，更首创性地系统阐述了自在于通信系统之外的信息的控制功能。

对于一切活的机体，特别是对于人类来说，控制和信息是不可分割的，也就是说，要实现有效的控制，就必须具有足够的信息。

控制论继承和发展了反馈理论。维纳等发现，目的性的行为可以借助于有反馈的控制系统来实现。对于给定的系统目标，如果对系统的参量或结构进行调整，并把调整的效果作为一种新的信息反馈给系统，根据目标和效果信息的关系可以对所作的调整进行适当的补偿，从而使系统趋向给定的目标。这样，通过反馈就把目的

性行为这种生物所特有的概念赋予了无生命的机器,从而突破了生命体和非生命体的界限。从信息的角度说,控制论的贡献,突出了研究信息问题要和系统行为联系起来。这也是我们进一步探讨信息问题要注意的。

可以说,通过哈特莱(R. V. L. Hartley)、申农(C. E. Shannon)和维纳(N. Wiener)的开创性贡献,信息的通信模型确立了。这个模型的要点是:

(1) 构成通信系统的要素及其联系:信源→编码→信道(信号及其传递途径)→解码→信宿;

(2) 信源体和信宿体是独立于通信系统之外的自在体,其部分性态通过编码和解码成了通信系统的构成要素——信源和信宿;

(3) 信息是信宿反映的信源的性态,是通信系统传递的东西;信息和传递信息的通信系统既有根本的联系(两者共生),又是本质上分离的。

2. 广义通信系统

信息的通信模型第一次最重要的泛化,是把人的认知过程看作一种通信过程,认知的东西——知识就是信息。明确地把信息作这种泛化理解的正是维纳。维纳在1950年出版的《人有人的用处——控制论和社会》一书中写道:"信息这个名称的内容就是我们对外界进行调节并使我们的调节为外界所了解时而与外界交换来的东西。接收信息和使用信息的过程就是我们对外界环境中的种种偶然性进行调节并在该环境中有效地生活着的过程"[7]。在这里,维纳把人与外部环境交换信息的过程看作是一种广义的通信过程。维纳在《控制论》中已经把通信泛指人与人、机器与机器、机器与自然物、人与自然物之间的信息传递与交换。因此,维纳把信息和通信的这种泛化是很自然的,可以说是他的《控制伦》内容的必然延伸。

在这种泛化的框架下,信息的形态有了多样的发展,不但知识,还有种种符号、数据、图像以及决策、方案、命令等形态的信息。同时,"通信系统"方面也层出不穷地发展出种种获取、传递、储存、处理信息的设备和技术(通信技术或信息技术)。

这种泛化给人类社会的发展带来了巨大的影响,有极为重大的意义。当今人类的社会是信息社会,可以说就是这种泛化的影响的反映。在这种泛化的框架下,人们不断寻求能传递知识的"通信系统",使人们通过种种"通信系统"获得种种信息——丰富的知识,又应用获得的知识,加工形成新的信息,传递给对象,影响和改变对象,如此循环往复,使人类认识世界改造世界不断地在广度深度向前发展。

需要指出,由于在泛化的框架下,各种文字、数据、符号、图形以及决策、记载资料等都成为信息,因而各学科、各行各业的各种形态的信息迅猛增加,并且出现了众多以管理信息(包始收集、储存、检索、查询、调用)为目的的管理信息的理论、技术和手段,形成了众多的"信息科学"和"信息学",如管理图书、资料和文献的"图书馆与信息科学"、"(管理经济数据的)经济信息学"、"(管理生物数据的)生物信息学"等

等。本文不研究这一类学科的信息。对于通信工程方面的“信息技术”,如有线传播的电脉冲和无线传播的电磁波等的调制解调,以及正在研究的“量子信息学”的纠缠态调制和编码问题,本文也不进行探讨。

3. 引发和编码(含解码即反向编码)

上述传递信息的通信系统模型和广义通信系统模型,有两个判据性的事情,即引发和编码。

引发是对信息而言的。我们说,信息是信宿反映的信源的性态,这里的反映,是一个引发过程,即由信源的性态引发的信宿的性态变化。信宿性态的变化内容,首先含有信源的直接性态,再加上被衍生引发的和信源相关的性态。直接性态和衍生性态都是信源体的内部结构及其和外界联系所固有的。如一个信源的性态“张三死了”,如果信宿是不认识张三的人,只引发了“有个叫张三的人死了”,如果是不住在一起的儿子,则引发了“父亲张三死了”。又如不同的人看见一枚古铜币,对古铜币没有研究的人看了,只引发了“这是一枚周圆中有方孔并饰有某种图案的铜币”,但对古铜币有研究的人来说,会引发出有关这枚古铜币的一系列状况,包括和铜币有关的社会经济状况。即使对同一个有研究的人,由于不同的时间,不一样的知识状况,所引发的内容也不一样。总之,对信息而言,“引发”是核心的关键,一定的信源性态,能否被信宿反映,以及反映的具体情况如何,都取决于“引发”。“引发”是信源体和信宿体之间存在相互作用的表现。

编码(含反向编码——解码)是对通信系统而言的。例如,对人类的语声通信来说,空气成了说者(信源)和听者(信宿)之间的信道。说者的脑区信息通过发音器官“编码”空气的振动频率,空气的振动——声音,进入听者的耳道,撞击耳鼓,通过中耳中的听骨系统把声波耦合为内耳中液体的振动。一旦声音被转换为液体的振动,耳蜗就像一个透过率随频率变化的传输线,声音的从高频到低频的不同频段的能量被储存在一些细小的纤毛,它们可以把机械运动转化为神经脉冲,并与储存的声波共振。神经脉冲传入脑的听觉区,听者就听到了说者的语声。耳朵把声波转变成神经脉冲,就是“反编码”——译码。这样的过程,就是由发音器官、空气、耳朵构成的通信系统传递语声信息的过程。由此可见编码(含反编码)是一个通信系统,所以成其为通信系统,即能传递信息的判据性的关键,所有的通信系统都是如此。

4. 一个重要结论

通过上述分析,综观人类社会的通信和通信系统传递的信息,可以得出一个重要的结论:信息是信宿所反映的信源的性状,和通信系统的传递过程无关。信息是信源体和信宿体之间存在某种相互作用的表现,这种“相互作用”,可以通过和其他相互作用的转换,从而克服“时间”、“空间”或其他因素的局限性,使自己体现出来。

二、生物信息和通信

人类的信息通信模型应用于生物学领域,已是科学界的共识,已成为生物学的常规范式。虽然维纳在《控制论》中已原则上阐述了生物信息和通信,但具体到细胞层次的信息内涵和通信的机制是近半个世纪来逐步发现弄清的。

生命形态表现生命的过程实际上就是传递信息的过程。在遗传中,生物体亲代传递给子代的不是生物体形态,而是编码在 DNA 中的全部遗传信息;在发育中,生物传递的是少数细胞下达的指令性信息,以此规范所有细胞的发展方向,是遗传信息的表达;在发育成长后,生物体通过细胞通信完成其整体的复杂行为,并能对环境刺激作出响应,适应多变的外部环境,保持着内环境的稳定。

以下就具体看一下遗传、发育和细胞通信的过程和机理。

1. 遗传

在遗传中,生物体传递的不是生物体形态,而是编码在 DNA 中的全部遗传信息。从 1900 年重新发现孟德尔的遗传规律,到 2000 年 6 月 26 日宣布人类基因组"工作框架图"绘制成功,以及到 2001 年 3 月六国科学家公布了人类基因组图谱及初步分析结果,标志着遗传信息的编码和解码的初步揭秘。

人们现已确认:遗传信息的载体是基因——DNA,生命活动的承担者是蛋白质(由 20 种氨基酸构成)。

DNA 由两股互补的平行分子链组成,平行分子链形成双螺旋结构。分子链由四种核苷酸组成,每种核苷酸有它特有的碱基,它们是腺嘌呤(A)、鸟嘌呤(G)、胸腺嘧啶(T)、胞嘧啶(C),遗传信息就包含在 A,G,T,C 这四个字母编写的语言中。蛋白质是执行许多细胞功能的大分子:它们是细胞的结构单元,它们形成催化细胞内化学反应的各种酶,它们调节基因表达,它们使细胞移动,还负责细胞相互之间的联络,细胞的特性和功能几乎全由细胞自身能够合成的蛋白质所决定。

DNA 并不是由它自身来直接指导蛋白质合成的。染色体上 DNA 分子的核苷酸序列首先拷贝成另一类核酸——RNA(核糖核酸),与这些 DNA 片段对应的 RNA 拷贝被用作指导蛋白质合成的模板。因而遗传信息的流向是从 DNA 到 RNA 再到蛋白质。从细菌到人类的所有细胞都以这种方式表达遗传信息,这称为分子生物学的中心法则,是生物体亲代的编码信息在子代解码过程的基本规则。

从 DNA 到 RNA 再到蛋白质分子生物学的中心法则,是生物体亲代和子代之间典型的通信过程,通过这个过程,亲代实现了控制子代复现自己的生命形态——大体相同的蛋白质结构和功能。

DNA 双螺旋结构模型的提出,是人类自然科学史上的一个重要突破。DNA 结

构给我们的启示是多方面的。首先,DNA 的双螺旋结构,揭示了遗传物质的复制机制,而这一复制机制正是生命最重要的特点——连续性的分子基础。其次,DNA 的碱基序列,蕴藏着生命的所有信息,构成了生命的另一重要特点——多样性的分子基础。第三,特别重要的一点是,DNA 结构模型揭示了生命是数字式编码的,而不是模版式的靠模。

2. 发育

一直到十几年前,对一个受精卵是如何经过细胞分裂、分化而逐步发育成幼体再到成体的,几乎还一无所知。生物的发育机制,一向被称为生物学的最后一个谜团。20 世纪的最后十年,随着分子生物学手段被应用于发育生物学的研究,这个谜团才被逐步解开了。

早在 1969 年,英国生物学家沃尔坡特(Lewis Wolpert)提出了一个基因表达的模型:不同基因的表达被由化学信号的浓度梯度所打开或关闭,而浓度梯度可以通过扩散产生。以后的发现表明,果蝇胚胎的早期发育,采用的的确是这种模式。卵巢营养细胞中 Bicoid 基因最早表达,转录信使 RNA。这些信使 RNA 抵达受精卵的前端,在那里被翻译成 Bicoid 蛋白质。这种蛋白质从受精卵的前端向后端扩散,形成了浓度梯度,沿梯度形成某种“轴线”。三组不同的基因对应不同的蛋白质浓度,被打开和关闭,它们又进一步打开和关闭其他的基因,信号被逐级放大。

轴线的形成决定了早期的发育模式。早期胚胎总是沿着前后轴线(头部和尾部)和背腹轴线(顶部和底部)方向分化。卵的前部发育成为成体的头部;后部发育成为尾巴;背部在上,腹部在下(从幼虫的上方观察)。浓度梯度由 RNA 和蛋白质组成。

受精卵发育成为成熟个体就按照这种预定的通路进行。这些通路有着共同的作用机制。每条通路被卵子外部的局域化事件所启动,形成卵内的一种信号定位。这种信号以不均匀分布的蛋白质形式存在,它们被称为成形素(morphogen)。它的局部聚集(或活动)左右着周围区域的命运并以此形成特殊的结构。在每个系统中,成形素既是一种转录调控因子又可导致局部区域转录因子的激活。

前部发育所需的成形素是 bicoid 蛋白。而形成前部结构所需的就是适当的 bicoid 产物浓度。bicoid 蛋白的浓度与前部结构的发育有关:减弱浓度梯度导致前部结构发育成为后部一样的结构,而增强浓度梯度导致前部结构区域的向外增生,因此,bicoid 蛋白作为成形素,以浓度依赖方式决定胚胎的前后部位置。

实验证明,浓度梯度对由细胞组成的组织发育也很重要。

上述发育过程,鲜明地阐述了发育作为“信息传递”的重要性质:

受精卵——子代所携带的 DNA 是亲代遗传信息的编码信号,受精卵作为子代生命活动的启动,发育为成体生物体,也就是亲代的遗传信息不断解码,“引发”子代

个体发生一定的性态发化，或者说，"引发"子代反映出亲代的性态，作为信宿——子代，一定要具备特定的性态，对受精卵来说，处于化学信号一定的浓度位置，就是决定性的必须具备的特定的性态。[8~10]

3. 细胞通信

生物体通过细胞通信完成其整体的复杂行为，并能对环境刺激作出响应，适应多变的外部环境，保持着内环境的稳定。

上世纪末国际上权威的著作《基础细胞生物学——细胞分子生物学入门》关于细胞通信是这样阐述的：

"一个人把一个信息传送给另一人，可能是先把信息用笔写在纸上，随后读出声来，并且通过电话线以电脉冲的形式传送出去，最后在接收者的脑内以神经脉冲的形式表达出来。在依次相连贯的信号途径各阶段有着各种不同形式的信号分子，它们是用来表达相同信息的。有一些信号传送的关键部位，在那里信号从一种形式转变为另一种形式。这种信息的转换过程叫做信号转导。

"在细胞之间传送的信号比人类的信息传递简单得多。一般，由发信号细胞产生一种特殊类型的分子，并被另一个细胞——靶细胞——用一种受体蛋白检测出，这种受体蛋白专一性识别并响应这种信号分子。在靶细胞信号通路的接受端，这个受体蛋白执行信号转导过程的第一步。受体蛋白把进来的细胞外信号转换为指导细胞行为的细胞内信号。

"信号的接受始于细胞外的一个信号源和属于细胞本身的靶分子相逢之处。其实每一种靶分子都是受体蛋白，它通常仅由一种类型的信号所激活。受体蛋白执行信号转导开始阶段的任务：它接收外部信号，并产生一个新的细胞内反应信号。通常，这仅是随后细胞内信号转导过程链的开始。在信号转导过程中，信息从一组细胞内信号分子传送到另一组，每一个信号分子都激起下一个信号分子的产生，直至代谢酶的激活、基因表达的启动和细胞骨架产生了变化，其最终结果是细胞的反应。

"细胞内信号分子的传递链或信号级联反应具有几个关系重大的功能：①它们把信号从接受部位传递到(就物理意义讲)起应答作用的细胞结构，这个结构常位于这个细胞的另外的某个部位。②它们把信号变换为能刺激细胞反应的某种分子形式。③在大多数情况下，信号级联反应也放大所接收到的信号，使信号更强，所以几个细胞外信号分子足以激起一个大的反应。④信号级联反应也能分送信号，以致平行地影响几个过程：在信号通路的任何一个阶段，信号都能分流而被传递到一些不同的胞内靶上，创建信息流程图中的分支，激起一个复杂的反应。⑤最后，信号级联反应的每一步易受到其他因素干扰。因此，信号的传递会根据细胞内外经常发生的那些情况而能被调变"[11]。

这几段引文，已把人类传递信息的通信模型应用于生物体的细胞通信阐述得很

具体了。

4. 小结

我们从两本最新的权威的生物学著作整段摘引，或摘用书中的文字和术语阐述了生物体的遗传、发育和细胞通信，就是佐证本节开头所说“人类的信息通信模型应用于生物学领域，已是科学界的共识，已成为生物学的常规范式”。从当前生物学领域的研究成果可以看到，只要把信源和信宿换成生物体，人类社会的信息通信模型完全适用于生物界。不但从细胞到组织、器官到生物个体和群体的生命活动，都是信息传递过程，而且也印证了信息的通信模型的重要结论：信息是信宿所反映的信源的性状，和通信系统的传递过程无关。

三、通信与相互作用（通信系统的物理本源——相互作用）

徐光宪在超分子化学成就的基础上，把信息的通信模型和相互作用联系起来，提出“统一”的信息概念，其要点如下：

通信有四个要素：信源、信道、信宿、信的。“信的”是通信的目的。任何通信都是有目的的，例如人类通信为了交流等目的，昆虫发送性信息素与异性昆虫通信的目的是为了交配生育子代等。所以“信的”应为通信的要素之一。编码、解码、噪音等可以合并在信道要素之内。

任何物质的微观粒子、宏观物体、宇观天体都有某种性质相异而互补的“互补配偶子（体）”“互补配偶子”之间有通信，它们互为信源和信宿。“互补配偶子”之间都有某种相互作用，这就是它们互相联系的信道。它们通信的目的就是互相吸引，组成高一级的粒子或高一级的动态平衡体系，这就是“信的”。

例如：质子和中子是一对互补配位子。它们可以互为信源和信宿，发出和接受的信息就是强相互作用，通过强相互作用互相吸引，组成高一级的结构原子核，如氘核，He^{++}，C^{6+}，O^{8+}等。质子和中子也有结构，它们是由夸克组成的。各种不同的夸克也是互补配偶子，它们通过强相互作用组成质子和中子。

又如：带正电荷的原子核和带负电荷的电子也是一对互补配位子，它们互为信源和信宿，发出的电磁相互作用（库仑吸引力）就是信道，通过后者组成高一级的结构“原子”[12]。

徐光宏的观点有两点特别重要：第一，把信息、通信直接和“互补配偶子（体）”，以及“互补配偶子”之间都有某种相互作用联系起来，第二，把信息、通信和“互补配偶子”相互作用的结果“信的”直接关联起来。我们认为“相互作用”是基本的，“互补配偶子”是“相互作用”的作用体（可称为作用子），“相互作用”必有其传递的载体（可称为传递子），“相互作用”的过程大体分两个阶段：首先是被作用方反映对

方性状的阶段；紧接着是被作用方的性状变化。第一阶段是作用子的“通信”，第二阶段是作用子的行为。由于是“相互作用”，一般来说，以上的过程是循环往复的过程。

我们已经阐述了源于人类社会的传递信息的通信模型，也适用于生物系统。这两大层次统一的信息通信模型有没有实质的物理背景呢？我们认为是有的，这就是人类社会和生物界的各种通信过程的信息传递，都是形形色色的相互作用的体现，可以认为所有的通信过程的物理本源是相互作用。

当今，科学界已形成一个基本共识，就是客观世界最基本的存在是相互作用。如 1999 年 3 月召开的第 23 届国际纯粹与应用物理联合会代表大会通过的决议就说“物理学是研究物质、能量和它们的相互作用的学科”[13]。

自 20 世纪 60 年代后半期发现 3 K 宇宙背景辐射以来，大爆炸宇宙理论逐渐被广泛接受。根据大爆炸宇宙理论，当今的宇宙中有各种层次的结构，如核子、原子核、原子、分子、地球、太阳系、银河系、超星系团，都是后来逐渐形成的。宇宙诞生后 3 分钟，中子和质子全部结合成原子核。大约过了三四十万年，原子核俘获了电子，稳定地形成电中性的原子，长程的万有引力开始起作用，逐渐形成星系团、星系、恒星等结构。

图 2 是当今科学界所接受的大爆炸模型对宇宙演化的描述。

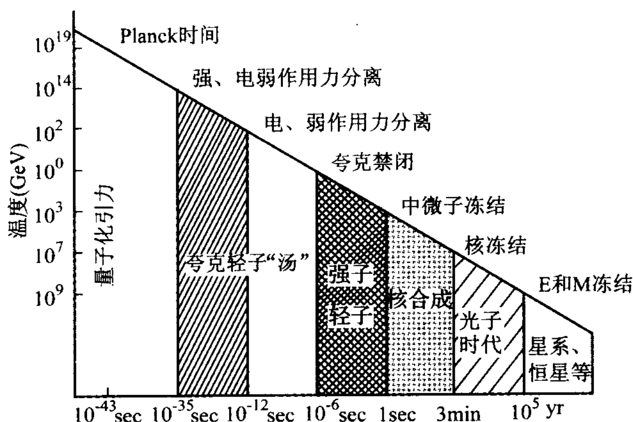


图 2　涉及宇宙大爆炸理论的事件的现行理论示意图。
横坐标是时间，纵坐标是温度(以 GeV 度量，1GeV 约为 10^{13} K.[14]

在粒子层次，标准模型已给出了客观世界最基本的相互作用的图像：相互作用必有相互作用体(粒子)，统称为费密子；相互作用必有其传播载体(粒子)，即费密子之间交换某种粒子传递这种相互作用，传递相互作用的粒子，统称为玻色子。已经实验证实：最基本的相互作用有四种：引力、强作用力、电磁力、弱作用力(已经实证：

电磁力和弱作用力可以统一为“电弱力”)；费米子有夸克、电子等 48 种；玻色子有胶子、光子等 12 种(加上目前还只是理论预言的引力子和希格斯粒子，共 62 种粒子)。目前认为这 62 种粒子是没有内部结构的，只能用一些基本的物理量和量子数来表示(如质量、自旋、重子数、轻子数等)。

在宇宙大爆炸之初，当温度下降时，中子和质子形成原子核(通过强作用力)，温度再下降，原子核通过电磁作用力俘获电子生成原子，这些层次物理占主导地位。原子间通过电磁作用的共价键力组合成分子，再靠非共价键力(范德瓦耳斯力、氢键力、离子键力等)构成越来越复杂的分子，这个层次，化学占主导地位。分子接着缔合成聚集体和膜——由此产生原始细胞，演化出各种复杂系统——生物体，这个层次，生物学占主导地位。今天的主流生物学已经应用信号传导的通信模型阐述生物体的遗传、发育生长、新陈代谢和对刺激产生反应等生命活动过程的物理化学机理。

物理层次和化学层次的相互作用，和生物层次人类社会层次的相互作用有着实质性的不同，简单说，物理层次和化学层次的相互作用是直接传递的，生物和人类层次的相互作用可以间接传递。从信息传递的通信模型来说，生物和人类层次，要多一个信号转换的过程，这就多出了转换后的一段信号传递过程，也就多出了信号级联反应所体现的编码(转换)和译码(反向转换)两大环节。正由于多了信号的转换过程，才出现了稳定性和多样性的统一。

这就提出了两个问题：有无必要把信息的通信模型应用于物理和化学层次的相互作用？我们认为区别情况对待更好。从相互作用的物理本源的统一和相互作用的形式的多样复杂化来说，在物理化学层次不引入信息和通信概念为好，能更明晰说明事物如何由统一的本源演化出复杂的多样性。

但从系统科学视角，从级链式的复杂性演化来说，引进信息概念有积极的意义。从超分子化学的创始人莱恩(Lehn. J. M)为什么竭力提倡在超分子化学中引入信息概念，可以看出这一点。

超分子是分子之间的结合，借助的结合力是非共价键力。同共价键力相比，非共价键力，是指范德瓦尔斯力、静电作用力、氢键力等，属于弱相互作用(是相对于共价键力这种较强的作用力说的，不是粒子层次的弱相互作用)。

20 世纪 80 年代，随着对冠醚化学研究的深入，化学家发现分子之间的多种作用力具有协同作用特性，通过协同作用，分子之间能克服弱相互作用的不足，形成有一定方向性和选择性的强作用力，成为超分子形成、分子识别和分子组织的主要作用力。协同作用不是随意在任意两个分子之间都能完成，而是需要有一个特定空间环境作为前提，通过一定形式的相互匹配，这些匹配可以是配体与受体的匹配、分子与电子互补、尺寸与形态的兼容或刚性与柔性的调节。也就是说，分子之间的匹配具有高度的专一性和选择性。

受体对作用物的选择性结合并产生某些特定功能的过程，超分子化学将其定义

为“识别”，它是一个自组织过程。按照“信息”是信宿所反映的信源的性状，可以认为，识别实质上是分子或超分子进行信息传导的过程，这一过程可以看作是一条信息链或叫信息级链。由此，化学系统可以在一个分子或超分子的结构特征中(大小、形状、特性和相互作用场所)贮存信息，还可以通过各种化学实体的状态或联结性贮存信息。这样，分子识别就是分子存贮和超分子读取分子信息，超分子化学就与分子存贮、超分子读取，及通过分子和超分子的结构和瞬时特征来处理信息的过程有关。可以看出，莱恩是从相互作用由简单向复杂的演化角度，对超分子化学引进信息概念的。在莱恩看来，虽然化学处理的是直接相互作用，但产生了级链式的复杂演化过程，引进信息概念是有积极意义的，乃至是必要的[15]。

从系统科学视野来说，即使在粒子层面，一切粒子和相互作用，都是作为费米子和玻色子组成的相互作用系统而存在的，引进信息概念，即把费米子和玻色子构成的相互作用系统，对应于由信源、信宿和信道构成的通信系统，至少和现有的物理理论是相容的。这样，从粒子层次起，直至人类社会的各种“相互作用系统”，都可以和信息的通信模型有所对应。以信息和通信概念来研究各层次的相互作用，研究它们作为系统和环境的关联，研究它们作为系统，其复杂性演化的规律，是很有意义的。

参 考 文 献

[1] 李宗荣等:《理论信息学导论》,中国教育文化出版社,2006 年 1 月,第 122 页
[2] 闫学杉:《信息科学的历史、现状与未来》,2005 年信息科学交叉研究第一届全国会议,北京
[3] 钱学森:《关于思维科学》,上海人民出版社, 1984 年,第 19、145 页
[4] 转引自:钟义信:《信息科学原理》,北京,北京邮电大学出版社,2002 年 10 月第 3 版,第 33、47、34 页
[5] C. E. Shannon:《通信的数学理论》,沈永朝译,吴伯修校,译文载《信息论理论基础》,上海市科学技术编译馆,1965
[6] N. 维纳著,郝季仁译:《控制论——或关于在动物和机器中控制和通信的科学》[M],北京:科学出版社,1985 年版
[7] N. 维纳:《人有人的用处——控制论和社会》,陈步译,上海,商务印书馆,1978 年 6 月第 1 版,第 9 页
[8] 方舟子:《寻找生命的逻辑——生物学观念的发展》,上海,上海交通大学出版社,2005 年 9 月第 1 版,第 150 页
[9] Müller W A:《发育生物学》,黄秀英等译,北京,高等教育出版社,施普林格出版社,1998 年 8 月,第 122～141 页
[10] 本杰明·卢因:《基因Ⅷ》,余龙等译,北京,科学出版社,2005 年 2 月,第 1051～1091 页
[11] 艾伯茨等:《基础细胞生物学——细胞分子生物学入门》,赵寿元等译,上海,上海科学技术出版社,2002 年 6 月,第 438、442 页

[12] 徐光宪:化学信息学的探索与思考,2005年信息科学交叉研究第一届全国会议,北京
[13] 转引自:陆果:《基础物理学教程上卷》,北京,高等教育出版社,1998年9月,第1版,第1页
[14] 转载自:[美]物理学评述委员会,总论(90年代物理学),伍长征等译,北京,科学出版社,1992年4月,第35页
[15] Jean-Marie Lehn:《超分子化学——概念和展望》,沈兴海等译,北京,北京大学出版社,2002年7月

说 撄 宁

朱照宣
北京大学力学系，北京，100871

撄宁，是我建议在系统学范畴内对 homeostasis 这个名词的汉译。

Homeostasis 这个英文词汇，是美国生理学家 Walter B. Cannon (1871—1945) 在 1926 年造的，用来说明高等动物在外界条件变化是生物机体具有保持相对平衡和稳定的能力。比如，人的体温在正常情况下在环境有变化时总能维持在 37 摄氏度。在 Cannon 之前，法国生理学家 Claude Bernard (1813—1878)曾有一术语"内环境"(milieu intereur)来说明这种性质，Cannon 采用 homeostasis 这个字，来源于两个希腊字根，分别说明保持和相同。他有关这问题的专著是"The Wisdom of the Body"(1932 年，Norton 版)。

一个系统能够在外环境有扰动时维持有自身某些性能不变，是系统具有的某种稳定性(或者鲁棒性)。1947 年 N. Wiener 在其《控制论》第四章"反馈和振荡"结尾处对 homeostasis 作过讨论。半个世纪以来，homeostasis 已经拓广到用于生理学以外的许多领域。为了说明这种联系，不妨用搜索引擎如"百度"或 google 核查一下。我采用汉字和英文混合的"某某学 homeostasis"作为关键词，用"百度"搜索得到的条目数如下(你如果作同样的搜索，数字当然会有出入，下面数字无非想说明一些倾向)：

化学 2310(条)，	生理学 1420，	生物化学 859，	数学 827，
哲学 696，	心理学 628，	动力学 598，	物理学 565，
病理学 530，	组织学 422，	生态学 398，	控制论 396，
力学 395，	胚胎学 365，	动物学 357，	人类学 335，
生物物理 297，	精神病 277，	细胞学 269，	社会学 268，
中医学 198，	经济学 189，	营养学 184，	信息论 176，
语言学 171	天文学 109，	社会心理学 90，	管理学 78，
人工智能 73，	教育学 72，	神经网络 74，	系统工程 70，
系统学 67，	自组织理论 55，	气象学 45，	模式识别 43，
城市规划 34，	金融学 26，	财经学 24，	中药学 15，
变态心理学 8，	儿童心理学 6，	法理学 6，	经络理论 6，

人口学 5，	宏观经济学 5，	鲁棒性 4，	犯罪心理学 3，
智能设计 2，	反馈理论 2，	微观经济学 2，	森林学 1，

并不是搜索到的每一条都说明这门学科或理论确实和 homeostasis 有关，有的仅是这几个汉字和那个英文字出现在同一博客网站漫无边际的神聊中，有的是出现在同一英汉科技词汇里。我对搜索结果中关心的只是这种情况：在出现某某学这几个汉字（中文方块字）的同一中文条目或中文文章里，还出现了一个汉字术语，比如“自稳态”或“动态平衡”，而在汉字后面紧跟着一个括号，里面写着英文字 homeostasis，这样的条目当然会被搜索能力很强的“百度”收到。显然条目或文章的作者是为了加深读者对概念的理解，也因为他（她）担心所用的汉语术语，还没有得到普遍认同。的确，如果把百度搜索结果中带括号的英文字 homeostasis 前面的汉译名记下来，那是多种多样，甚至可说是五花八门的，幸运的是英文是同一个 homeostasis。

以上的搜索（用半中半洋的关键词）是我杜撰的，用其结果说明两点：

第一，homeostasis 已经进入到各种学科领域中，第二，homeostasis 还没有统一中文译名。

这就是我这一小文的出发点。

从第一点出发，我认为 homeostasis 应该进入系统学的基本范畴。系统学（systematology），按照其创建者钱学森的说法，是尚待建立的“系统科学的基础科学”（1986 年 1 月 7 日的讲话，见《创建系统学》第 5 页）。我理解这要求系统学研究各类系统（也许涉及各种学科）中所共同关心的问题，系统学中的概念术语应该来自各种具体的问题，它们的产生是一个抽象化的过程。比如“反馈”，可能最早见于蒸汽机的自动调速机构，见于电子管振荡器，而到控制理论里，它就变得更抽象些，适用范围也更宽些。上述《控制论》第四章正是从这类具体的例子出发，导向反馈和振荡，最后提到 homeostasis 和 homeostasis 机构的讨论。

既然讲抽象，那么，如果模型提炼得合适，数学工具是能发挥重要作用的。当年，B. van der Pol 从电子管振荡回路分析中提炼出的一个形式简单的微分方程，从而促使 A. A. Andronov 阐明数学中极限环和自然或工程里出现持久的不衰减的振荡现象两者之间的关系。更早一些年代（20 世纪初），动物学家 A. J. Lotka 观察到池塘里两个种群（大鱼吃小鱼，小鱼吃水草）共处的结果，此消彼长，此长彼消，数量持久地起伏着。在他岳父数学家 V. Volterra 的帮助下，用数学分析了其中的规律，这是种群动力学（population dynamics）里的捕食者-猎物系统（predator-prey system）的来由。用本文关心的主题说，它从理论上阐明生态学中 homeostasis 的一个简单例子。

更复杂一些，系统的 homeostasis 也许和它是否具有某种 robustness 有关。Robustness，在不同的学科里分别称为“稳健性”和“鲁棒性”。其实，用通俗的说法，

robust 相当于北京方言(也已进入普通话)的“皮实”,我们过去戏称某些设备“傻大黑粗”,改用好话说就是它皮实,在恶劣的环境下也能正常工作,这不正是因为系统自身具有 robustness 或“皮实性”吗?最后的“粗”,是一个褒义字。无生命系统的皮实性,是否也算一种简单的 homeostasis?早年苏联 Andronov 和数学家 L. Pontryagin 曾企图建立类似 robust system 的数学理论,提出所谓 glubaya sistema,相应英语是 coarse(粗壮)system。他们称这种性质为 glubnostch (coarseness,而在 S. Lefschez 的 free translation 变成了 structural stablilty)。现在,在各种系统中出现而被当作 homeostasis 的,似乎应是具有比 robustness(或 coarseness)更高明的本领。看来,这些性质之间的关系有待于进一步探讨和精确化。

第二点是 homeostasis 的汉译或者它在系统学中用什么相应的中文术语。下面是全国科学技术名词审定委员会(简称全国名委)已公布的《某某学名词》中与“英文名” homeostasis 对应的“汉文名”,括号中“化学”指《化学名词》,年份指出版年,余类推,均科学出版社出版。

内稳态	(化学,1991,列于生物无机化学)
自动调节机能	(建筑园林、城市规划,1998)
稳态,恒定性	(昆虫,2000)
体内稳态	(生物化学,1990)
稳态	(生理学,1989)
体内稳态	(生物物理学,1990)
体内平衡	(心理学,1999)
内环境稳定	(医学,六,外科,1997)
内稳态	(自动化,1990)
稳态	(自然辩证法,2003)

以上可能还不是全部。至于非名词权威性机构出版的工具书中,还可找到各种“汉文名”或中文译名,如:

《船舶大词典》:	自动动态平衡,自动平衡;
《英汉科技词天》:	1,自动调节
	2,体内平衡,心理状态稳定,内环境稳定
	3,[社会]自动平衡
	4,动态静止(输入和输出保持动态平衡)
《英汉技术词典》:	自动(调节)动态平衡

按照全国名委的规定，审定的是“汉文名”，并非审定英文的翻译是否正确。在一定意义下，并列只是参考。因此我不想对已经公布的经名委(通过各自学科的专家)审定的对应于 homeostasis 诸多名词建议“统一”或“规范化”。至于上面稍后列出的工具书，对使用者并无约束作用。因此，在系统学范畴内，相应于 homeostasis 的中文名(汉字)，可以不受以上名词的限制

在系统学里，稳定，平衡，调节等，都已经有约定俗成的涵义，它们大致来源于数学物理学自动控制等学科。Homeostasis，无论是 Cannon 的本意还是后来的延拓，强调的并不是“态”(state)，而是一种本领，一种能力，使所说的“态”能够维持下来(从英文字源说有 maintenance 的意味)。在系统学里，homeostasis 的定名也许要找个要概括住各式各样的系统，带有抽象性。

对专业名词的生长消亡的研究，渐渐形成了所谓“术语学”(terminology)。目前，在术语学比较普遍认同的定名原则之一，是“约定俗成”(语出《荀子・正名》)，但对应于 homeostasis 的汉文名如此分歧，达不到约定俗成。在带一般性的系统学里，也许定个新词更方便些。

在造新词方面，已故的王竹溪前辈有丰富的术语学经验。他认为，专业词最好少和生活用词相靠近，他把物理学中的 transportation 定名为“输运”，有意不用“运输”，沿用至今。他还认为必要时可引进一些不常用的汉字(电脑字库中有)，如把 charm quark 定名为“粲夸克”，粲字电脑字库有，音义又和 charm 相近。现在 homeostasis 多音节，音译不行。于是我想起采用较偏僻的词“撄宁”作为 homeostasis 的定名。我在力学的名词工作干了二十年，觉得在汉语的术语学里，一个词容易上口和传播的字数依次为 2134，两个汉字的词比单个汉字容易表达意义，三个的词就已略感长了，四个字的词在口语和传播中往往约定俗成为两个字，如“超级市场”简为“超市”，“公共关系”简为“公关”。四个字的专业词，比如“体内稳态”或“自动平衡”(且不说它们不能确切反映出 homeostasis 原意)缩成两个字更难从字面看出本意了。所以，我建议了两个汉字的“撄宁”提供讨论。

汉字“撄”，是把樱花的樱字，木字旁改提手旁，音相同，拼音为 ying 第 1 声，电脑常用字库中有。撄宁，拼音可写成 ying1ning2。撄的本意是“扰动”，转为“触犯”(《新华词典》收的是后者)。“撄宁”这词，最早见于《庄子・太宗师》:“其为物，无不将也，无不迎也，无不毁也，无不成也。其名为撄宁。撄宁也者，撄而后成者也。”陈鼓应(1935—　)根据上文今译最后一句为:“撄宁”的意思，就是在万物生死成毁的纷纭烦乱中保持宁静的心境。

庄子的撄宁，也许是后来道家修养追求的最高境界。曾任中国道家协会主席的学者陈撄宁(1880—1969，《辞海》有条目)取名可能本此。

如果和数理学科对照，受扰动而能恢复安宁，这性质是 stability。但是，stability 已约定俗成为“稳定”了。留着“撄宁”闲着没用，又不会受日常生活用语干扰，不

妨借来用作系统学中 homeostasis 的“汉文名”。如觉得太怪，我(参考专家王有志的意见)还有个从俗的退路：把 homeostasis 定名为“持稳”，单独用时称“持稳性”，道理不言自明。

参考文献

[1] 陈鼓应：《庄子今注今译》，中华书局，1983 年

[2] 维纳：《控制论》，郝季仁译，科学出版社，1962 年；Wiener，N：Cybernetics，Wiley，1948. Chapter4

[3] Hoerr N. L.，Osol，A，(Ed)：Blakiston's New Gould Medical Dictionary，2ed Ed.，1956，相关词条

[4] 钱学森：《创建系统学》，于景元、涂元季编，山西科学技术出版社，2001 年

[5]《科技术语研究》编辑部，为建设有中国特色的汉语术语学而努力，《科技术语研究》，2005 年第一期，卷首语

多目标(向量)优化理论的现状和展望

陈光亚

中科院数学与系统科学研究院,北京,100080

钱学森院士所创建的系统科学体系的基本内容之一是综合集成方法。这是中国古代哲学整体论思想的发展。整体论强调探索问题的本质和共性,研究系统全局的优化和系统的均衡。西方哲学中强调的还原论则更多地强调对问题性质的分析及具体的求解方法。因此,要求对问题的全面认识和解决,整体论和还原论是相辅相成的。实际上,在现代数学、经济学、运筹学以及管理科学的研究中已经自觉不自觉地用到了综合集成的方法,应用了钱老的系统科学思想。在现代数学中出现的很活跃的代数几何,代数拓扑等新的学科即是综合集成了代数与几何,代数与拓扑的核心内容,从而产生新概念、方法和结果。在非线性分析领域,人们在对不同问题的研究中发现的最基本的定理,如 Hahn-Banach 延拓定理、凸集分离定理、凸集支撑定理、次微分存在性定理、正泛函存在性定理等等,它们构成了非线性分析的基础。然而,人们后来发现这些基础性的定理在本质上是等价的。又如,对于优化问题的近似分析中,Ekeland 提出了 Ekeland 原理。几乎在同时,人们在对不同问题的研究中发现了 Caristi-Kirk 不动点定理、下降定理、花瓣定理以及山道定理等极为重要的结果。然而,人们后来发现这些定理在本质上也是等价的。在应用数学和管理决策问题的长期研究和应用中各自独立地形成了极为有用的数学模型,如,最优化问题、不动点问题、变分不等式问题、互补性问题、鞍点问题以及博弈问题等。然而,人们后来发现,以上这些问题都可以统一成所谓的均衡问题模型来处理。以上这些例子显示,在这一系列的研究中已经隐含了综合集成方法。现在我们面临的问题是如何更加自觉地应用钱老提出的综合集成方法来研究在社会、经济、自然科学中所遇到的各种问题。

这篇短文以多目标系统优化问题为例,阐述该领域的研究现状及发展,其中试图显示综合集成方法在研究中的应用。并以此篇短文庆贺钱老九十五周岁华诞。

一、向量优化理论的研究前景

多目标(向量)优化问题在最优化领域中是一个重要的研究方向,其重要性显示

在以下几个方面：

（1）强烈的实际背景不断提出许多新的问题和模型；

（2）需要新的数学概念、工具和方法；

（3） 向量优化与数理经济、决策和博弈论以及非线性分析的紧密联系。

国外著名学者对向量优化的研究也有类似的看法：

Rockafeller：

There are many basic, important and interesting problems in vector optimization.

Auslander：

There are so many interesting and significant topics in vector optimization.

二、向量优化研究的一些基本问题

1. 偏好和控制结构

我们引入下面的符号：

Y—向量拓扑空间

$D=\{D(y)\subset Y: y\in Y\}$，其中 $D(y)$是凸锥或凸集，D 称为控制结构

(Y,D)—向量优化问题的目标空间，它与一般的序空间是不相同的。

P. L. Yu 的非控解：设 $A\subset Y$ 是非空子集，$y^*\in A$ 称为 A 的非控解，如果不存在 $y\in A$ 使得 $y-y^*\in D(y)\setminus\{0\}$。

Yu—非控解的研究未得到发展。1974 年到现在，在这个课题的研究上只有不超过十篇论文发表。其原因在于非控解的定义要求太强，没有相应的数学工具去处理它。

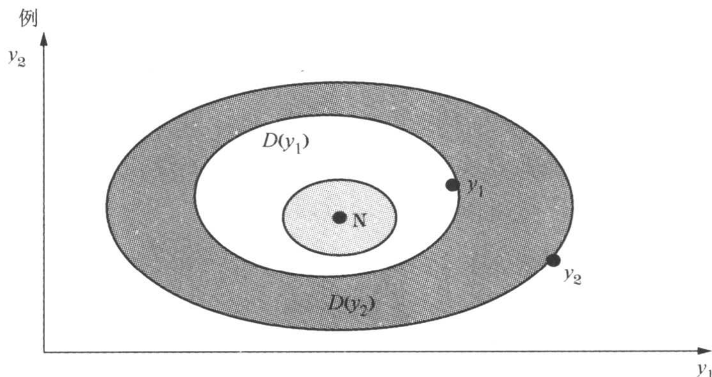
拟非控解：$y^*\in A$ 称为 A 的拟非控解，如果不存在 $y\in A$ 使得 $y-y^*\in D(y^*)\setminus\{0\}$。

拟非控解的研究得到发展，因为它可以用向量变分不等式来刻画且可以标量化，从而可以利用某些传统的数学工具来研究它。

但是有许多问题不可能或很困难用传统的方法和工具处理。例如在 D 中当 $D(y)$依赖 y 变动或 $D(y)$是凸集时，(Y,D)并不是典型的序空间。

此例中，N 点是核爆炸中心，其冲击波呈椭圆形状向外扩散。在椭圆面上之点受破坏程度是一样的。以 y_1 点为例，经过 y_1 点之椭圆内部之点的受破坏程度大于 y_1 点，而此椭圆外之点的破坏程度小于 y_1 点。因此，椭圆系$\{D(y):y\in Y\}$就界定了 Y 中点与点之偏好关系。

例



2. 偏好的标量化问题

标量化是向量优化的一个重要方法。其重要性如同数理经济中的价值函数(Value Function),概率论中的分布函数,模糊数学中的隶属函数。标量化不能等同于加权平均而是对于偏好或控制结构的量化处理。

A. P. L. Yu 的价值函数

在空间 Y 中界定一个偏好"p",价值函数 $v: y\to R^{\lambda}$, $\forall y_1, y_2\in Y$, y_1 p $y_2 \Leftrightarrow v(y_1)pv(y_2)$连续的,严格单调的 v 的存在性要求 Y 是连通的,对" p"是完全序,"p"是拟序且是连续和凸的条件。

Yu 的价值函数等同于 Debreu 在 1959 年的名著《Theory of Value》中的价值函数。

B. Gerstewitg(1983)非线性标量函数

$\xi_{ea}(y)=\min\{t\in R^1: y\in a+te-D\}$, $y\in Y$,其中 $\forall y\in Y, D(y)=D$ 是凸锥且 $e\in \mathrm{int}D, a\in Y$。

ξ 是连续的,正齐次、严格单调,次可加函数,函数 ξ 适合处理弱有效解问题。

Tammer 通过 ξ 得到了非凸分离定理,因此 ξ 适合处理某些非凸的问题。

C. 我们的研究

当 $D(y)$ 是变动的控制结构时如何构造 ξ?

$D=\{D(y)\subset Y: y\in Y\}$, $D(y)$是凸锥, $\mathrm{int}D(y)$非空, $e(y)\in \mathrm{int}D(y)\ \forall y$

$\xi(y,z)=\max\limits_{\varphi\in B^*(y)}\langle\varphi,y\rangle/\langle\varphi,e(y)\rangle$, $(y,z)\in Y\times Y$,

其中 $B^*(y)=\{\varphi\in D^*(y):\langle\varphi,e(y)\rangle=1\}$, $e(y)\in \mathrm{int}D(y)$

ξ 在 $Y\times Y$ 上是连续的,正齐次,凸,对第二变量是严格单调函数。

设 $\overline{D}=\bigcap\limits_{y\in Y} D(y)$, $e(y)=e\ \forall y\in Y$, $e\in \mathrm{int}\overline{D}$

上面的 $\xi(y,z)$ 退化成 $\xi(y,z)=\min\{t\in R^1: z\in te-D(y)\}$

这是 Gersterwitg 函数的推广，这里的 ξ 适合处理弱拟非控解问题。

问题：

a. 当 $D(y)$ 是凸集时，ξ 如何构造？

b. 构造一个新的 ξ 能处理拟非控解，甚至处理 Yu－非控解？

c. 通过 ξ 导出变动控制结构下的非凸分离定理？

3. 向量变分不等式问题

众所周知，数值优化问题在凸性和可微性的条件下，它等价于一个经典的变分不等式问题。那么，向量优化问题是否有类似的结果？

带变动控制结构的向量变分不等式问题：

设 X,Y 是拓扑向量空间，$S\subset X$ 是非空子集，$L(X,Y)$ 是 X 到 Y 的连续线性映射的集合，设 $D=\{D(y)\subset Y, y\in Y\}$ 是变动的控制结构，$T: X\to L(X,Y)$ 是向量值映射，基本的带变动控制结构的向量变分不等式，求 $x^*\in S$，使得

$$(VVI)_D \qquad \langle T(x^*), x-x^*\rangle \notin -\mathrm{int}D(f(x^*)), \forall x\in S$$

其中，$f: Z\to Y$ 是下面向量优化问题的目标函数：

$$V-\min_{x\in S} f(x)$$

$(VVI)_D$ 是我们自己建立的模型，它能刻画带变动控制结构向量优化问题的弱非控解。

向量变分不等式有其他的应用，例如：

A. 二水平的多目标规划问题；

B. 带向量值价格函数的网络平衡问题；

C. 网络经济中的一些问题；

D. 集合值函数的优化问题。

向量变分不等式的一种推广是所谓的平衡问题：

$f: X\times X\to Y, S\subset X$，求 $X^*\in X$，使得 $f(x^*, x)\notin -\mathrm{int}D(x^*), \forall x\in S$。

4. 向量优化问题的近似分析

非紧条件的数学问题总是一个有趣、重要的、困难的问题。

非紧集上的优化问题需要近似分析，求近似解。这个方向的重要结果是 Ekeland 变分原理。

重要性表现在：

A. 可以刻画数值优化的近似解；

B. 它与 Caristi-Kirk 不动点定理，Flower Petal 定理，Drop 定理以及 Mountain Path 定理的等价性展示了在非线性分析中新的研究和应用平台。

上世纪80年代以来,得到了三种条件不同,形式不同的向量值映射的广义变分原理。我们的工作:

A. 给出了统一的向量变分原理;

B. 给出了 Caristi-Kirk 不动点定理,Flower Petal 定理,Drop 定理的向量形态并证明它们等价于此统一的向量变分原理;

C. 第一次给出了集值映射的广义变分原理及 B 中各定理的集值形态并证明了它的等价性。

以上的工作有可能在向量、集值优化以及非线性分析领域展现新的研究方向。

参 考 文 献

[1] Guang-ya Chen, Xuexiang Huang and Xiaoqi Yang(2005): Vector Optimization: Set-valued and Variational Analysis, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, 541, Springer.

[2] Gerard Debeu(1959): Theory of Value. New York, John Wiley & Sons, Inc.

基于主体的建模方法——由来、理念和发展

陈　禹

中国人民大学经济实验室,北京,100872

基于主体的建模方法(Agent Based Modeling,简称ABM)是近年来得到普遍关注的一种描述和研究复杂系统的方法。它的出现是人们认识世界、观察事物的方法的一个飞跃。它为科学工作者描述、理解、设计、管理和控制各种不同类型的复杂系统提供了新的、更加有效的工具和思路,同时,还为我们深入认识和理解复杂系统的演化过程提供了方向。然而,目前在对于这种方法的理解和运用中,还存在着一些不确切的认识,甚至是误解。这种情况阻碍了对于这种方法的深入研究,也影响了它的更有效、更广泛的推广。因此,有必要对于基于主体的建模方法的由来和基本理念进行必要的讨论,以有利于对基于主体的建模思想的重要意义和深远影响的理解,更好地推广和普及这种有效的方法。本文将就基于主体的建模方法的由来、基本理念进行讨论,澄清一些概念,并在此基础上探讨基于主体的建模方法今后的应用前景和发展方向。

一、基于主体的建模方法的由来

基于主体的建模方法的提出,是从对系统变化规律的思考引起的。大量事实表明,经济、生态、生物等复杂系统的行为之所以复杂,其基本原因就在于:这些系统的“元素”是活的。而传统的各种建模方法正是由于忽视了这一点,从而无法有效地描述和说明这些复杂系统的演变规律。ABM从一个侧面概括了生物、生态、经济、社会等一大批重要系统的共同特点,为我们研究复杂系统提供了新的天地。

首先明确地提出ABM的是美国密执根大学的J.霍兰教授(John Holland),他在1994年的《隐秩序》[1]一书的序言中写道:

“本书讨论的中心议题,是近来备受关注的一个领域:复杂性(Complexity)。早在这个主题流行,甚至被命名前,乌拉姆就多次谨慎地对复杂性进行过精辟的描述。这本书中的很多论点都在乌拉姆的论述中出现过。在写这本书的过程中,我把重点放在复杂性的一个侧面——围绕“适应性”的复杂性上,这一领域现在被称为“复杂适应系统”(Complex Adaptive System,简称CAS)研究。我认为,由适应性产生的复杂性极大地阻碍了我们去解决当今世界存在的一些重大问题,读者将会在本书中

看到有关部门的内容。"([1]序言第六段)

ABM的方法可以概述如下:系统中的成员称为具有适应性的主体(Adaptive Agent),简称为主体。所谓具有适应性,就是指它能够与环境以及其他主体进行交流,在这种交流的过程中"学习"或"积累经验",并且根据学到的经验改变自身的结构和行为方式。整个系统的演变或进化,包括新层次的产生、分化和多样性的出现,新的、聚合而成的、更大的主体的出现等等,都是在这个基础上出现的。

ABM的方法把系统中的成员——主体,看成是具有自身目的与主动性的、积极的"活的"实体。另一个要点是:ABM认为正是主体的这种主动性以及它与环境的反复的、相互的作用,才是系统发展和演化的基本动因。宏观的变化和主体分化都可以从主体的行为规律中找到根源。在霍兰的第二本关于基于主体的复杂适应系统理论的书《涌现》[2]中,他进一步把这作为一种新的发展观加以发挥,以涌现为主题,详细分析了以新的主体的形成和出现为主要线索的关于发展的新视角。这两本书的思想是十分丰富的,值得认真体会。

关于CAS的思想一经提出,就迅速地引起了各界的重视。很快地,来自不同的学术领域的科学家把ABM的思想运用于各个领域,从经济到管理,从生物到生态,基于主体的建模方法(ABM)或称多主体系统(Multi-Agent System,简称MAS)的方法正在得到越来越广泛的应用,成为当今科学研究的一个新方法。

对于系统科学的研究人员来说,CAS和ABM是值得关注和重视的。这正是钱学森大力提倡的系统思想的具体体现和最新发展。这个发展方向很有特色,它在观察系统的思想方法上有新的突破,在实践应用上与当今社会的许多现实问题直接相关(从经济、社会、环境、生态直到教育和医疗),在描述和研究的手段上则充分运用了现代信息技术,因而这是一个大有希望的发展方向。希望能够有更多的同行进行更加深入的研究。

二、基于主体的建模方法的基本理念

作为一种新的思想方法,ABM具有以下三点需要强调说明的理念。

首先,主体(Adaptive Agent)是主动的、活的实体。

这点是ABM和其他建模方法的关键性的区别。正是这个特点,使得它能够用于经济、社会、生态等其他方法难于应用的复杂系统。

从元素到具有适应性的主体(Element——Adaptive Agent),不是一个简单的名称的改变。对于系统的组成部分,以前一般称为元素,单元,部件或子系统。作为与系统、全局、整体相对而言的概念,元素、单元、部件都是作为一个被动的、局部的概念而提出的。子系统的概念则加上了对于层次的认识,即在下一个层次上讲,元素、单元、部件本身又可以被看成是一个系统,而由更下一个层次的元素、单元、部件

所组成。然而即使在子系统的含义中，局部对于全面而言，仍然是处于被动的、被支配的地位。

具有适应性的主体的概念则与以上各种提法完全不同。它把个体的主动性提高到了系统进化的基本动因的位置，从而成为研究与考察宏观行为的出发点。事实上，复杂性正是在个体与其他个体之间主动交往，相互作用的过程中形成和产生的。在这里既没有脱离整体，脱离环境的个体，也没有抽象的，凌驾于“个体”们之上的整体。个体的主动性是这里的关键。个体主动的程度，决定了整个系统行为的复杂性的程度。

这里所说的主动性或适应性是一个十分广泛的、抽象的概念。它并不一定就是生物学意义上的“活”的意思。只要是个体能够在与其他个体的交互中，表现出随着得到的信息不同，而对自身的结构和行为方式进行不同的变更，就可以认为它具有主动性或适应性。适应的目的是生存或发展。

对比以前的建模方法，我们可以看到，它们之所以局限在物理学，或热力学类型的系统之中，正是由于它们忽略了个体的这种主动性和活力。

其次，个体与环境（包括个体之间）的相互影响，相互作用，是系统演变和进化的主要动力。

这个特点使得 ABM 能够运用于个体本身属性极不相同，但是相互关系却有许多共同点的不同领域。这种相互作用的观点是很有启发的。个体的相互作用才是整体的基础。当我们说“整体大于它的各部分之和”的时候，指的正是这种相互作用带来的“增殖”。复杂系统的丰富多彩正是来源于这种“增殖”。这种相互作用越强，系统的进化过程就越加复杂多变。

另外，这里的相互作用主要是指个体与其他个体之间的相互作用。强调这点有两方面的意义。首先，这里并没有一个凌驾于所有个体之上的整体的“代表”。对于每一个个体而言，整体的作用正是通过其他个体表现出来的。同样，每一个个体对于别的个体也起着“环境”的作用，或在不太确切的意义上讲，起着“代表”整体的作用，因为严格地说，每一个个体都不能独自代表全局。这就较好地说明了整体与个体之间的辩证统一关系。另一方面，在这些相互作用中，个体之间的关系存在着从“平等”到“分化”的发展过程。这就是说，在系统演化的早期，个体的潜力，或者说潜在的能力是差不多的。原则上，每一个个体都有多种发展前途的可能性。在相互作用的过程中，由于各种因素（包括随机因素）的作用，有的个体向这个方向发展，有的个体向那个方向发展，产生了结构，对称性被打破。这样，整个系统就呈现出复杂性，从而表现为从简单到复杂的演化。也就是说，相互作用是“可记忆”的，它表现为进化过程中每个个体的结构和行为方式的变化，以不同的方式“存储”在个体内部。

因此，ABM 发展了科学中强调相互作用的思想，使得进化的观念具体化了，落实了。它把适应性的思想，从生物学中引入到模型构建的领域。显然，这对于科学

研究的思想方法是非常有用的充实和扩展。

第三，ABM 通过主体和环境的相互作用，使得个体的变化成为整个系统的变化的基础，统一地加以考察，从而将微观和宏观联系起来。

关于微观和宏观的关系，历来也有许多简单化的、片面的观念。极端的还原论的观点是把宏观现象的原因简单地归结为微观，否认从微观到宏观存在着质的增加。另一种比较普遍的观念是：把统计方法当作从微观向宏观跨越的唯一途径或唯一手段。应当承认，基于概率论的统计方法确实是从微观到宏观的重要桥梁之一。宏观系统的某些属性可以理解为微观个体的某些属性的统计量，如气体温度之于分子的动能，总体国民教育素质之于每个社会成员的教育程度。这显然是重要的，正确地反映了微观与宏观关系的一个方面。然而，问题在于，这是不是反映宏观和微观关系的唯一方法？确实有相当一部分论者有意或者无意地把统计方法当成了唯一的联系微观和宏观的桥梁。曾有人做过这样的计算：如果地球上的有机物只是由于按照统计规律的偶然结合而产生的话，那么，从地球诞生到今天，连第一个蛋白质分子都还没有产生呢！显然，除了统计规律之外，一定还存在着其他的机制或渠道，它们同样也建立微观与宏观之间的联系。这种机制或渠道是什么呢？以前并不清楚。ABM 则在这方面给我们提供了一条新的思路。

如果个体没有主动性（比如气体中的分子），那么，它们的运动和相互关系的确只要用统计方法加以处理就行了。支配这样的系统的，确实就是统计规律。然而，如果个体是"活"的，有主动性和适应性，以前的经历会"固化"到它的内部。那么，它的运动和变化，就不再是一般的统计方法所能描述的。如前面讲到的分化过程，显然不是只靠统计方法所能加以说明的。

所以，在微观和宏观的相互关系问题上，ABM 提供了区别于单纯的统计方法的、新的理解。如果把这种想法加以推广，把宏观和微观看作是相对的层次的话，那么，它为我们认识、理解、跨越层次提供了十分有益的思路。而这又是系统科学的一个重要的基本课题。

由于以上这些特点，ABM 方法具有了与其他方法不同的，具有特色的，新的功能和特点。也正是由于这些特点，引导我们从新的角度、采用新的研究方法研究复杂系统的问题。

三、关于主体含义的两种误解

近两年来，Agent 一词在杂志和文章中出现得越来越频繁。这当然是表明 ABM 的思想已经得到了许多不同专业的人们的认同，这种新的思路开始在学术界和社会上得到了传播，这无疑是一件值得高兴的好事。然而，必须指出的是，在许多文章和介绍中也可以看到不少误解和曲解。我认为，目前需要着重纠正常见的误解

是以下两个方面。

最为普遍的一个误解是把主体简单地理解成一个软件模块，把ABM误解了一种设计软件的新方法，从而大大降低了它的意义。例如，有的文章冠以“基于主体的”某个模型，或者声称是以MAS为建模方法，但是仔细看了内容就会发现，只不过是把软件设计中传统的模块划分称为主体而已，其中既没有与运行环境的信息交流，也没有根据运行结果反馈进行的自我调整和改造。有的电子商务的系统设计中，把所有的功能模块都叫做为“智能代理”(IA, Intelligent Agent)，但是在实际的功能上并没有体现主体的最本质的特点。(其实，即使是软件代理意义上的Agent也不只是模块的概念。)Holland在他的书中，一开始是用的“Active Agent”一词，以强调其不同于传统的“元素”、“部件”、“模块”等概念，而且和信息经济学的“委托代理关系”中的“代理人”(Agent)也不是一个意思。确切地说，应当译为“具有适应性的主体”。Holland本人也说是为了简略而称为Agent——主体。这是我们在运用ABM或MAS概念时必须注意的一个误解。

另一种常见的误解，则把主体单纯地理解成具体的个人，这也是不确切的。事实上，企业、政府、人群都可以是主体，关键是研究的层次和范围。上面已经谈到，主体的概念为我们分析层次提供了新的思路。这里的含义是十分深刻的。传统的思维方式是单层次的。我们在传统的学校教育中所得到的、有意无意地给我们灌输的是这样一种观点：从书本上学到的理论是放之四海而皆准的，包括在各种不同的层次上。典型的例子就是牛顿力学。正是这种思想上的障碍，在我们接受相对论和量子力学的时候备感困难。从哲学上讲，这是一种把宇宙的复杂性仅仅归结为量的方面的形而上学的思想，即只承认世界在量的方面的无限性，而不承认世界在质的方面也是无穷的。据说拉普拉斯曾经说过：“牛顿是幸运的，他发现了世界的运动规律，而世界只有一个。”(没有查到出处)如果确有其事的话，那这就可以说是这种形而上学观点的典型表述了。(难怪恩格斯曾经在《反杜林论》中深刻地批判了拉普拉斯的绝对的确定论的观点。)回想起来，我们经常是自觉地或者不自觉地把自己所在的层次当作世界的全部，把这一个层次中的现象、规律、视角当作世界上唯一的现象、规律、视角，把这些东西不加分析地外推到所有层次、所有场合、所有对象，而否认了世界在质的方面的无限性。

我们现在越来越多地谈论多样性(Diversity)。其实CAS和多样性是内在地、不可分割地联系在一起的。当我们接受对策论的思想的时候，我们是从“一厢情愿”的，只从自己方面考虑问题的、理想化的(其实是无法实施的)“最优化”思路转变到了一种新的思路：承认博弈的另一方面也是活的这一事实，转而寻求相对优化的、然而是现实可行的“纳什均衡”。冯诺意曼和纳什的贡献就在于带领我们实现了这个思想上的突破。

回到层次问题上来，我们就是要把这种多样性的思想从“横向”扩大到“纵向”，

即承认各个层次的主体也都有各自的存在理由、各自的利益取向、各自的追求目标，一句话，也是“活”的！著名的作家 L. 托马斯在《细胞生命的礼赞》[3]和其他几本书中，用许多具体的例子告诉我们，我们身体里的有许多小生物(例如线粒体)，是单细胞生物经过亿万年的进化和演变，适应了人体内的环境生存下来的，它们并不是“为人类工作”，它们其实也是“自己过自己的日子”，也是有自己的目标、有自己的行为规则、有自己的“生老病死”的主体！它们已经不是“寄生”，而是你的身体的不可缺少的组成部分。如果人类忽视了它们和它们的行为规律，就会造成许多冲突和失衡，就会生病。从另一个极端——大的方面，读者可以从《第三种文化》[4]的有关章节中读到有关“盖亚”(Gaia)的论述，原来生态系统，甚至整个地球生物圈也可以被看作是“活”的东西！从遥远的星空观察我们的地球，如同看到一个活生生的、在呼吸和脉动的、不断和外面交换物质和能量的“细胞”——我们的地球！它也是“活”的！关于这种似乎是向“万物有灵论”回归的倾向，读者先不必急于否定，不妨想一想它的有道理的地方。(建议读者参看《未来 50 年》[5]一书的第四章。)

CAS 和 ABM 正是在这样一种大的文化和思想背景中产生出来的。是人类对于宇宙探索和认识的新进展。所以，简单地把 Agent 按字面理解为“代理人”，一定是具体的个人，那就太离谱了。

总之，在研究和运用 CAS 和 ABM 的时候，要注意深刻理解 Agent 的深刻的意义，防止把这个概念简单化或者曲解。

四、关于发展的一种新的分析框架

从上面的讨论中，我们已经提到关于发展的一种新的分析框架正在形成，这将是一种注重质的变化、更加丰富多彩地、深刻地反映实际情况的关于发展的思路。可以说，这种思路的核心就是主体这个概念，各类主体的行为将被看成是系统发展变化的根源和动力，各种主体的形成、发展、变化、交互作用构成了系统演化的主要线索。

这种发展观点认为：在比较简单的系统中，主体是同质的。同一类的主体有许多，他们的结构、功能都是一样的。然而，在不断变动的环境中，差异总是会以各种形式出现的。这些具有主动性的主体，Agent 们为了追求自身的利益和更高的效率，就会趋向于分工，从而，把差异扩大和固定下来。这就导致了功能上的专业化，这就是分工。从底层次的主体来说，就是从同质走向了多样化。而从高层次来说，新的、综合形成的主体就形成了。这样的一种演化过程可以概括成为以下的步骤：

A. 不确定性：由于系统内外各种因素造成的不确定性，原来同质的主体之间出现差别；

B. 主动性：在主体们追求优化和效率的动力推动下，主体之间开始产生分工；

C. 分工和冲突：分工带来以前没有的、有关利益分配的新问题，需要新的分配比例和机制；

D. 博弈和合作：在矛盾和冲突中达到某种平衡，经过博弈的过程，稳定的合作关系建立起来；

E. 新主体的形成：以合作为纽带，新的稳定的主体形成；

F. 新层次的形成：新的主体形成了新的层次。

关于这样的发展过程我们可以举出三个领域作为例子：

在生物领域，共生现象和多细胞生物的出现就是这样。原始的单细胞生物是同质的、简单的。多细胞生物中，原始的、简单的细胞演化成为多种多样的、具有复杂分工的各种具有专门功能的细胞，形成了生物体的内环境。例如我们的血液、淋巴等，出现复杂的生物结构。在更高的层次上，共生现象出现了。形成了动物和动物、动物和植物等多种类型的共同生活的生命体。关于这方面的例子，读者可以从托马斯的《细胞生命的礼赞》[3]和《水母和蜗牛》[6]中看到许多生动的例子。从更大的范围看，生态系统是更为庞大复杂的系统，多种生物形成的食物链形成了作为一个整体的生态系统。如此向上发展，直到“盖亚”(Gaia)的概念。

类似的情况我们可以在经济领域中看到。原始社会的人们恐怕可以说是完全同质的。农业经济有了地区的分工，但是它还是比较简单的系统，在同一地区、种植同一作物的农户还是同质的，用同样的工具，按同样的方式，生产着同样的产品。从农业经济到工业经济的转变，是一个飞跃，在这里分工的作用是显而易见的。亚当斯密的《国富论》里有经典的描述。新的主体——企业产生了，新的制度和分配方式出现了，这就是工业化的过程。我们今天正面临着新的演化阶段——信息化。新的分工，新的冲突，新的机制和组织正在出现。

人类社会的发展不也是这样吗？根据社会学的研究，从原始的人类群体到部落、国家的出现，同样经历了分工、冲突、机制的形成和固定、新的主体的产生的演变过程。每一个层次的形成，每一个层次的主体的利益和行为规则，构成了当今社会的种种现象和事件的基本环境和背景。

限于篇幅，本文不准备进一步展开这些具体内容的讨论，只是在这里说明主体这个概念的重要意义和深远影响，以及强调对此精心研究的必要性和重要性，希望引起同行的关注。

五、基于主体的建模方法的特点和应用前景

作为一种建模方法，ABM 具有三个显著的特点：高度的抽象性，描述的简明性，模拟的可操作性。由于主体概念的高度抽象，ABM 可以用到许多非常不同的领域。

它的方法简单明确，又有许多软件包和软件平台支持，可以进行大规模的模拟和仿真，这些特点对于其应用和推广发挥了积极的作用。

经济科学可以说是 ABM 的最主要的应用领域之一。把参与经济活动的企业或个人，看作是完全被动的对象、行为方式几乎是完全固定的，这正是传统的经济学偏离现实情况，无法正确反映实际的根源之一。圣菲研究所经济组的负责人，J·布赖恩·阿瑟(Brian Arthur)以向传统的"收益递减律"提出挑战而闻名。他在以《作为演化中的复杂系统的经济》为题的论文集中，用 ABM 的方法讨论了经济学中的许多问题，包括股市价格、微观经济行为的模型、市场结构的演化、经济地理分布的变迁、通货膨胀问题、经济活动中的对策问题等，得出了许多新的、富有启发性的见解。正如该论文集的题目所表明的，把经济系统看作一个由具有适应性的主体构成的、处于不断演化过程中的复杂系统，为经济科学开辟了一个更为广阔的新天地。

类似地，生物科学也是一个 ABM 得到有效应用的重要领域。生物体与人造的机器之间的根本区别就在于，生物体中各个层次都有自己的内在的活力，而不像机器中的零件那样，完全是僵死的、被动的。按照现代生物学的观点，人体中的许多细微部分，如血球、抗体、线粒体等都是以人体为环境的、活生生的、独立的生物体。它们各有自身的发展规律和行为模式，各有自身的发展规律与演化过程，而不是任何一举一动都必须听从总控部分的指令。目前人们正是用这样的新观点来研究免疫系统的规律、DNA 分子的形成、生物体对外界环境的适应机制等具有重大现实意义的课题。

生态系统也是由活的、具有主动性的个体组成的复杂系统。按照有的专家的意见，生态系统和生物体一样，也有自己的生长、发育以致生老病死的生命周期，甚至认为地球表面的生物圈就可以看作一个巨大的生物体。由于关于生态系统的研究与环境保护有直接的联系，所以对它的研究在近年来得到了特别的关注。从 ABM 的角度来看，生态系统中整个物种的运动规律和行为规则，构成了整个生态系统演化规律的基础。生态系统宏观形态和状况的变化，常常可以从微观物种的变化中找到意想不到的缘由，从而为环境保护措施与政策的制订和选择提供依据。在圣菲研究所的工作中，关于环境和生态系统的研究也占有重要的位置。

在管理与控制方面，ABM 的思想也正在得到应用。例如，关于机器人的设计，人们正在从集中控制、功能齐全的大型机器人转向研制和开发较小的、基本功能比较简单，但是具有学习和适应功能的小型机器人。有人甚至提出这样的设想：在未来的家庭中，不再是由一部功能齐全的电脑按事先预定的程序完成各项工作，而由许多像蚂蚁一样的小型机器人，随机地在屋里走来走去，随时随地地、按照它们所遇见的情况处理从打扫卫生到安全保卫的种种家务事。多年来形成的集中控制式的，一切都事先计划好的管理和控制模式，将被一种全新的，立足于分散的，具有主动精神的个体的集体行动所取代。这样的系统将具有比今天的机器更大的灵活性、更强

的适应性、更多的主动性，简言之，更像具有智能的生物体（参看《宇宙波澜》、《砂滩上的图案》等书）。

如果把上面所说的思想应用到管理领域，那么这将是管理思想的一次根本性的变革。众所周知，一百多年来，管理科学的发展走过了曲折的道路。在泰罗制的观点下，被管理者不过是机器上的一个零件，他们没有也不需要有任何主动性，所要做的只是严格地执行指令。这种"非人性化"的管理思想已经被事实证明是不符合实际的，是不可能正确地处理管理领域中的各种实际问题的。从 20 世纪 30 年代以来，许多管理专家从人的本性、人的需求等方面研究和提出了种种解决方案。然而，总的来说，这些观点没有超出"我管你听"的框框。而 CAS 理论的提出，使得管理策略与被管理者的主动的、适应过程相一致，从而正在形成一系列全新的管理思想与方法。

如果把范围再扩大一点，进入社会学的领域，我们可以看到：社会形态和文化形态的变迁，社会与个人利益的协调，各种层次上的局部与整体的冲突与协调，以致国际经济、国际政治中的许多实际问题（从民族冲突到贸易争端）都包含着与 CAS 理论思想类似的场景和情况。在圣菲研究所的课题组中，有一个组专门研究美国西南部各种文化的互相渗透、互相融合的过程。当然，这种研究无疑是需要十分慎重的，十分具体的，而不是套用几个新的名词术语就能奏效的。然而，这种思路的启发作用是十分明显的。近年来，随着互联网的广泛普及和应用，以复杂网络为背景的研究工作十分活跃，例如小世界网络，无标度网络（Scale-free Network），社会网络分析（Social Network Analysis，简称 SNA）等。读者可以参看《小小世界》[7]、《社会网络分析》[8]等书。

总之，ABM 的应用已经不只是单纯的理论研究，而是有非常广阔的应用前景的。在短短几年内，它已经引起了许多领域的研究人员的关注，它的应用前景是不可限量的。

参考文献

[1] [美]J. 霍兰著，周晓牧、韩晖译：《隐秩序》，上海科技教育出版社，2000 年
[2] [美]J. 霍兰著，陈禹等译：《涌现》，上海科学技术出版社，2001 年
[3] [美]L. 托马斯著，李绍明译：《细胞生命的礼赞》，湖南科技教育出版社，1996 年
[4] [美]J. 布罗克曼编：《第三种文化》，海南出版社，2002 年
[5] [美]J. 布罗克曼编，李泳译：《未来 50 年》，湖南科学技术出版社，2004 年
[6] [美]L. 托马斯著，李绍明译：《水母和蜗牛》，湖南科技教育出版社，1999 年
[7] [美]D. 瓦茨著，陈禹等译：《小小世界》，中国人民大学出版社，2006 年
[8] [美]沃什曼等著，陈禹等译：《社会网络分析》，中国人民大学出版社

物质全程演化背景下的系统科学观

范文涛
中科院武汉物理与数学研究所，武汉，430071

对系统科学或复杂性研究的呼吁是20世纪中叶以来科学技术发展呈现出一方面学科越分越细，同时又在不同学科领域相互交叉渗透综合发展的趋势，以及在以往发展中取得辉煌成就的还原论被用来处理人类所面临的复杂系统时遭遇的局限的需求中应运而生的。其目的是希望更全面深入地从客观世界事物的整体与部分以及层次关联在时空中演化的全程描述角度来研究支配客观事物运行的基本主旋律，并依据这种更深层次的对世界规律的逼真，建立新世纪又一轮科学技术发展的理论基础，以指导新的发展实践。

为此，近20年来，世界上已有大批的一流学者从不同的学科切入点入手，展开了卓有成效的探索。这包括：以耗散结构理论的提出者 I. Prigogine、协同论的创立者 H. Haken 为代表的集体以演化概念为中心展开的一系列工作；美国新墨西哥州 Santa Fe 研究所以演化仿真和复杂性概念为对象进行的有成效的探讨；我国的钱学森院士及其集体（包括一些管理科学的以复杂性为题进行研究的学者）以开放复杂巨系统研究中"从定性到定量综合集成"的方法论为指导，做了大量工作，并积累了许多宝贵经验；以 M. Suzuki（铃木正雄）为首的日本学者以及我国学者李衍达院士、方福康教授及其集体也包括国际上被称为后基因组的学者群以系统生物学或信息生命学概念为题旨在实现物理学与生物学和物理学与经济学的整合方面做了大量的理论与实证性研究，取得了一系列结果；最后，也许是最重要的，是由数学与物理学界的一大批学者在非线性研究的旗帜下，在所展开的可概括地称之为非线性效应的理论分析方面取得的一系列成就；此外，又出现了渊源于1960年前后由著名数学家 Erdos 和 Renyi 所提出的被称为 ER 随机图模型的奠基性数学理论[27]，而在1998年 Watts 与 Strogaty 在《*Nature*》上发表的文章引入了小世界（Small—World）网络模型[28]后所掀起的研究复杂网络的热潮，并迅速地获得了许多的理论与应用方面的具体结果。与此同时，我们——在学科上属于中国系统工程学会的一批老中青的科学工作者也长期面对这一总的时代要求，以建立系统科学与工程（或事理学）或复杂性研究的基础理论为目标，进行了一些思考与探索，获得了许多有意义的结果。

下面将分三个部分予以表述。只是本文的篇幅有限，而已有的内容比较庞杂，在许多的情形只能点到为止，并且使用的语言只能是科普性的。欲知其详的同行学

者可参见后列的主要相关文献。

一、对形成本文工作思路的相关学科成就与启示的概述

大约是从20世纪初以来的实验物理和理论物理学的革命性进展所带来的物理世界统一图景更进一步深刻展现，也导致了哲学思想领域的重大变革。其中一个主要趋势就是物质的非实体化过程。这一过程给予了人们这样的启示，即世界如果被看作是一个关系场或关系网，那么我们经验所能直接感觉到的客观实在就是这个关系场中的一个个稳定的结点。而每一个结点本身又是一个关系场，而世界则可被理解为一个由一层层关系网络所构成的等级体系。这是一个以一系列实验与观测事实为基础的思想来源。另一方面，人类的理性思维与唯象思考所建立的多学科成就也给人以启示，即它们之间的许多内容可以作更深层次理性统一表述的可能性的蛛丝马迹，不仅可以从多学科交叉协调发展的实践中找到，还可以从思辨性的哲学思考和理性的探索得见端倪。人们深深地感到了，不仅客观世界物质化过程是如此的富有秩序、和谐与质朴；而且在不同的学科领域中阐述一些原理与规则时，仿佛竟只是在用不同的语言讲述同一个统一的规律。

其实这些观点早在人类的古文明时代的柏拉图、亚里士多德特别是我国的春秋战国老子、庄子与墨子的道德经墨经儒学典籍中的中庸、尔后的牛顿、莱布尼兹、19世纪的马克思和恩格斯、20世纪的普朗克、爱因斯坦，直到当代的霍金与彭罗斯等大师都早在各自的时代领域用不同的语言与方式明确地论断过了，并且还在作进一步的探求与论述。他们都首先是在哲学、物理学、数学中贯彻了这一认识，其中物理学尤其是理论物理又是带头的。

众所周知，理论物理学家的神圣使命，就是希望以单个的基本定律去代替大量的唯象知识，以达到对自然界的统一描述。他们至少是已经部分地达到了这一目标，证明了（以力学为例）不仅历史上先后出现的牛顿第二定律，虚位移原理，欧拉—拉格朗日方程，哈密顿原理，最小作用量原理，以及哈密顿-雅可比方程中的任何一个，均可以推出其他的规律；而且它们还是可以相互转化，彼此等价的。进一步，他们还在几种基本的相互作用力的统一性即所谓的统一场论探索方面作了持续地努力，这集中地体现到了霍金与彭罗斯通过黑洞辐射的发现，进一步将引力、量子力与统计力学统一在一起的努力与进展上。

这一雄心与使命也应当是今天的系统科学工作者的基本信念和工作目标。因为，今昔相比，不同的只是：物理学家面对的是以自然系统为对象，而系统科学工作者所面临的则是除了自然的物理系统之外，还包括这个世界的物质演化从蛋白质出现，经植物、动物一直到出现了人类这个认识和改造世界的主体之后，形成的一系列包括管理、控制与决策性的事理系统，以及由人类活动与大自然关系等形式形成的

多种生态系统等。从广义的角度来看,它们也是一种"客观"的"准自然"系统。这当然就更增加了难度。然而,在近十年以来,我们对于事理系统(亦内含自然系统)也得到了同样的结论,即:在系统科学的认识下,任何一个事理性(也包括自然的)系统,也又可被称为系统平衡协调与优化的一对在一定条件下可相互转化的等价问题。比如交通网络系统的平衡问题,等价于一个变分不等式所描述的系统问题,就像一个物理上的力学系统可以用微分原理表述的平衡问题,以及用积分原理写成"优化"问题,也可证明其两者是可相互转化从而等价的一样。

不仅如此,我们也得到了作为保守的力学系统上述诸原理与作为事理性的最优控制系统的两个仅有普遍原理——庞特里雅金的最大值原理和贝尔曼的最优化原则,在我们所指出的意义下的等价性,以及这仅有的两个事理性优化系统原理也是可相互转换,从而也是等价的(当然这一结果是在隐含了证明中出现的两类系统中的特性函数,都满足数学上的连续与可微性条件的假定下得到的)。

为了进一步沟通物理与事理、管理、社会、经济、生态以及人伦道德等的关系,我们又研究了物理系统拉格朗日函数、作用量与最小作用量原理的物理意义与我国传统文化、学术元典精神内涵的一致性,其细节可见[16]。

特别是,我们探讨了物理学的原理是否在物质演化进入生命——生物演化层次依然起作用与如何起作用的。由于对这一问题的认识正处在方兴未艾之际,原仅只在[12]中通过引证《科学美国人》上发表的"生命的结构:一组普遍的建筑规则似乎指导着生命结构——从简单碳化物到复杂细胞和组织的设计"中列举的大量实验事实与解释提出了一些可能性的预想。

最近我们又得知:由于近年来在生命科学领域工作的学者们基于对"基因与蛋白质很少单独起作用,而倾向于成组的通过网状的交互作用而影响生物体的功能"的基本事实已被确认,开始了由主要是"由高维到低维的剧烈变形——毁坏细胞抽取 DNA 以积累和分析多种蛋白质分子知识的全基因组的分子生物学"的还原论工作方式,转变到了"把基因组和蛋白质组看成一个网络系统"综合多种分子及其相互作用的知识,以了解生物系统功能的"后基因组信息学"——亦可称为"功能基因组系统学"的研究。他们认为,这一研究将以(整体论性的)综合为特征,以网络(中的相互作用)分析为基础,通过基因信息来揭示生物有机体的系统功能信息,能使我们进入对生命基本规律的认识;并明确地指出了:这一研究可能会最终导致一个极为重要的综合——"生物学和物理学法则的大统一",或者说"生物世界与物理世界在更高层次上的统一"。

更进一步,几乎在与此同时之际,我们又见到了我国学者罗辽复教授提出的系列研究结果中,乃至给出了"遗传密码突变危险性的全局极小化"和"核酸和蛋白质序列演化机制的最大信息原理",以及"分子演化树"的定量与半定量的明确表述;并进而明确地提出了"生物功能的物理观"与"生命演化的物理观"的概念。这就使得

我们原来曾以理性原则和直觉为依据而亟盼的“生命演化过程也应当是遵从物理学的理性原则的”结论已不再是假设与猜想，而接近真实了。

除此之外，在进行我们工作的期间，基于早期的比较粗框性的原始构想和与时俱进的逐步深入与细化，关注并从我们所在学会工作的角度，推动且部分参与了如下几部分与我们所做工作分工互补的（亦是我国学者原创得到的）重大成就。这包括在下面将叙述的框架体系中必须弄清落实或有所交待的如下几个分块，即在系统的结构与环境参数有漂移和变化的条件下，系统的稳定态（亦即所谓的临界态、相变态和涌现等）间的转移机制与量变规律、对于社会经济乃至军事系统的决对策问题行之有效的所谓古典的主动或奇正决-对策理论的现代化定性定量相结合的理性描述与算法制定、以及数学上一系列基本优化原理及其求近似解的次优化原理间的两组等价性的证明。它们分别是方福康教授等一系列的实证研究得到的J—结构理论及其在经济、生态与社会系统的广泛应用；陈挺与王先甲教授等建立的具有激励机制的多利益主体多目标的决-对策系统以协商谈判仲裁的机制求解的所谓双赢-多赢机制理论，以及陈光亚教授所完成的两层次的系列优化原理俱是等价的证明给出的。

与此同时，我们也关注并学习了汪秉宏、陈关荣、陆君安及吕金虎、徐玖平、李衍达、孙之荣、狄增如、王有贵和陈六君等一大批一流的老中青学者分别以在自己工作的具有非线性效应特征的诸如复杂网络及其动力学、系统生物学、生态经济系统的动态演化、经济物理或物理经济、经济管理的动态理论——稳态与失衡以及系统的混沌控制与同步等理论领域下获得的卓有成效理论与实证研究结果所展现出的“准统一图景”，都给予了我们极大的启示、勇气与激励。这期间我们自己也以几个具体的生态水利、农业生态经济与社会（所谓的三农问题）三元复合系统为对象，认真地解剖了几只有动态演化特征的复杂系统的“麻雀”，而壮了自己的胆。

二、建立系统科学或复杂性研究基础理论的一种可能的从定性到定量综合集成的框架思路与相应的系列结果

正是基于上述相关领域的基本发现与相应理论的启示，我们逐步地形成了一个现在被称之为“物质全程演化背景下的系统科学观”。整个工作将由总标题为“建立系统科学或复杂性研究基础理论框架的一种可能途径与若干具体工作思路”所辖的包括本文在内的共 14 篇系列文章以及进一步开拓展开的《复杂系统演化理论与方法研究》……博士学位论文与后续文章构成。限于篇幅，这里仅只能对如下的几个核心内容予以简要的表述。

第一，给出了一种客观世界物质演化过程的统一图景与一种可能的系统科学或

复杂性研究基础理论建立的框架。这是整个工作的核心，其总的目标是试图从现代物理、分子生物学与脑神经解剖学……学科的最新实验事实及相应前沿领域，围绕着宇宙物质全程演化概念与背景研究的展开所获得的理念与成就为基础，按照“由大爆炸理论所描述的物理世界之最初情景出现以来的扩张并降温的过程中，世界物质总是在其不同时空之具体结构状态下的四种基本的相互作用属性力形成的制约机制造成的物质能量及相伴的信息结构与分布，仍呈非完全平衡协调态势的推动下，不断地一层一层完成的全方位整体性进一步的精细结构化的平衡协调，实现其该层次从无序到有序的演化——这一总的自然法则”以及我国传统文化学术元典中，由整体论指导表述的定性分析与现代哲学指出的可将客观真实看成一个关系网的认识为主线，提出了一种建立系统科学或复杂性研究基础理论的定性框架，即概述为由所谓概念化的洋葱模型表征的由宇宙物质演化而成的“世界图景”与相应的定量描述的框架思路和若干实现的细节方法。这是与“一”中首段所述“现代哲学的一个重要趋势就是客观现实的非实体化”的内涵相互呼应一致的。也就是说，一旦经由一系列实验事实的自然综合集成的定性概括，得到了所述概念性的洋葱模型表现现实的物质全程演化的“世界图景”的动态展示后，则很自然地将此客观实在的真实与系统网络化的概念相结合，而贯彻这一思想。也就是说如将此真实图景看作是一个关系网，如是，我们的经验直接感受的客观实在就是这个关系网络中的一个个稳定的节点(即通常所说的稳态!)，而每一个节点本身又是一个子关系网，构成这个子关系网的则又是一个更加细小的有内在联系的节点网络。如此继续推演下去，则世界可被理解为一个由一层一层关系网络所构成的等级体系，而每一个节点的变化，都会导致整个关系网的连锁反应或者“雪崩”。至于这一过程的动因与基本规则，则是由大爆炸理论所描述的原始物质运动单向扩散——冷却过程自然形成的，一层一层不断深化的“精细平衡”与“整体协调”演化机制所支配着的。或者说演化机制就是这个所谓的不断演进的一级一级的多层次的“精细平衡”实现与“整体协调”。

其间还在引出客观世界概念意义下的洋葱模型后，依据其中任意块体的形成结构给出了一个简单与复杂系统的分类标准，并提出了五条实现上述关系网络结构系统基础理论模型描述的具体思路。(详见[12])

第二，在系列论文的相关部分分别对相互作用、进化、演化、适应性与适应度与复杂性包括科学与技术等概念，进行了新的界定与分析；对突变、分歧、吸引子、协同、分形等概念及与统计物理的关系，在其所揭示的思路与视角下，进行了趣意盎然的诠释；尤其是系列文章之四所提出的“从韦达定理与控制论到突变、分歧、混沌、分形……及与统计物理学的关系”的论述可以认为是整个框架理论的一条中心思路；因为它是基于基本的实验事实及其与已有多门前沿学科知识的相关联系中提出并可以实现的，因而具有基本的作用。此外还论及了非线性与信息的本质及其人本意

义下的价值概念与相互关系;系统地考察了熵、能量、李雅普诺夫指数和豪斯道夫维数等概念的直观内涵及其间的定量关联;并在此过程中坚持的同样理念之下,很自然地得到了"量子化在微观与宏观系统中均是基于同样的渊源而普适的"以及"系统即是稳态",而且"稳态"、"临界态"、"本征态"、"相"和"涌现"等只是同一个"稳态"内涵物在不同学科中的不同叫法等结论。

第三,通过对物理系统(量子力学所考虑的微观系统以及以最小作用量原理刻画的一般力学系统等)的复杂性与其相互作用本质的考察,指出了对于一般的复杂系统,可以引入适应度函数(反映主体生存概率或能力、能量的一个量)的概念,如是则主体间的相互作用就可以理解为是适应度或生存概率之间的转化与平衡的过程。这样一来,我们就可以在进一步的研究中运用博弈论的观点研究复杂系统的稳态过度与转移等问题了。这是在系列文章之二([12])中对所谓"洋葱模型"任一块体分类后演化过程的"精细平衡"构成整体稳态的原理性机制时所表述的"其构成原则不外两种:一是块体自身整体的自优化(如系统是确定性的)或自身整体熵(如系统是随机的)极大化;二是块体与外环境通过相互间质-能交换过程或者共同熵的极大极小化达到绝热平衡"的进一步可操作的描述与刻画。

接着,还作为实例演绎,结合经济系统的特征,考察了涌现、演化、路径依赖等系统科学的重要概念,指出了,复杂系统的过程是以稳态或本征态一次又一次的新结构的涌现作为自己的阶梯的,因而可以说,演化是"路径依赖"的。

此外,在研究战略的选择机制时,还提出了可以认为是主观性质的适应度函数与战略分布的两个评价体系。前者是一个衡量战略"绩效"的客观量,而后者则反映了主观偏好。在博弈论中,一个主体所采取的战略的适应度是在主体之间的相互作用中加以确定的。为了讨论均衡态的特征,首先从数学的角度证明了在基于进化论的自然选择机制作用下的战略分布将朝着适应度函数最大化的方向演进,这表明了理性是自然选择的结果,它是演化的目标而不是前提,从而以此为基础,就可以顺理成章地运用博弈论的思想来研究复杂演化的机制了。

第四,对关于复杂网络及其动力学研究与上述框架理论可相整合的诠释。在系列文章(之十)中,很自然地论述了 20 世纪以来被广泛探讨的所谓小世界和无标度复杂网络研究与所提框架理论的内在关系,并在对复杂网络拓扑结构和指导理论综述的基础上,进一步考察了网络的复杂性测度问题,特别是通过已经有的他人成果——"幂律是以伪装形式出现的玻尔兹曼律",揭示了幂律作为复杂网络系统的"指纹",并不是某种神秘,而是具有坚实的统计物理学背景的,因而这一理论也是可与上述的基础理论框架相整合的。然而,我们也指出了它又是一个有独特重大意义的新的工作方向,因为它给出了本质上为另一种比较普适的基于机理分析与随机关系图相结合得到的计算由统计系综构成的统计物理系统相空间等势面上的相分布的方法,而不需去求解此分布所满足的那个烦死人的吉布斯-玻尔兹曼微分-积分

方程。

第五，在应用方面的几个值得一提的内容：

首先，运用系统科学的基本概念与制度演化经济学的一些基本概念，提出了制度的演化过程是外部性的转化和平衡过程，并对新制度经济提出了基于系统科学观点下的若干研究思路。

其次，对自组织临界性理论及在雪崩动力学中占重要地位的一类生物演化模型进行了研究。在弱相互作用的情形，从数学上严格证明了系统代际寿命的数学期望是有限的，以及最小适应度序列是几乎必然收敛的重要结果；在强相互作用的情形进行了数值模拟计算，并提出了相互作用是复杂多样性根源的结论。

此外，还针对三峡大坝工程有关的深水截流的复杂性进行了分析。并从此系统的演化特征出发论证了相关理论的合理性、根据微结构浸水湿化机理设立了两个临界值、把传统的沙堆模型做了合理的扩张和改进，从而把深水截流问题纳入到了复杂系统演化的理论框架的直接应用之中。

第六，作为本节也包括节"一"的一个总结，我们要特别强调地说明：在整个系列文章中，除了上述的对一些概念内涵剖示与关联揭示外，在文章的逻辑布局上都是围绕着说清道白如下的基本事实展开的：即自然物质在其演化全程的诸阶段所形成的诸理论，即无机物演化阶段遵从的"物理"、蛋白质有机物质与生命演化阶段遵从的"生理"、直到人类及人类社会出现后演化阶段形成的"事理"（系统工程）、"管理"、（制定人类行为规范的）"伦理"、刻画人与自然关系的生态学规律——生态学理、自人类意识出现起由感性-悟性-理性不断反复循环领悟深化而成的"哲理"、以及与测量、记事、计算过程逐渐积累升华发展而来的"数理"等八个"理"是一个理，而且同时也包括了曾由马克思首次说道的"自然科学与社会科学是一门科学"的论断。

我们认为，明确的回答上述问题，是所有可真正称之为系统科学或复杂性研究的基础理论必须展现的目标与境界，此亦即老子在《道德经》的首章末句所谓的那个"玄之又玄"的"众妙之门"，亦是又一古云"万流归宗"与"殊途同归"，以及易说的"天道从简"、"大道如婴"即此之谓的绝妙注释。对此我们在已发表的 10 篇和即将发表的另 3 篇系列文章中，论述了其彼此的"一致性"和用数理方法与理性原则严格地证明了其各个基本原理间的等价性以及部分的实证与比较分析给予了明确的回答。

三、结　语

可以认为，所有上述的这些工作结果，都为近 20 年来我国系统科学基础理论也包括系统工程的理论与应用研究提供了新的基石，并具有我国学者自身的原创性。它们均将为我国的系统科学与复杂性研究基础理论的建立作出各自的贡献且彼此之间相辅相成，并进而一体化。

本来行文到此就可以讲几句系统科学或复杂性研究的基础理论该是如何如何的或者如有的先生所讲的“可以临门一脚了”，但是，我们觉得目前还不能如此快的作结论。因为到目前为止，虽然我们已经初步是比较完整有据地表述了由“八个理是一个理，两门科学是一门科学”这样一个基本事实，但也只是较为浅层地满足了由霍金所言的“自从文明开始，人们即不甘心于将事件看作互不相关而且不可理解的”那个心愿。我们的所有结论是以建立在上世纪 20 年代哈勃发现红移定律后而由伽莫夫(1948 年)提出的所谓“大爆炸理论”作为前提的现代物理学展现的世界图景(世界观)，以及由此引出的宇宙演化观念贯穿至今的知识累积整理得到的。然而这个物理学却仍然没有对于我们生存其中的何来何去作出完整的描述，或者说还仍然不够基础，所以只好到此为止。当然无论如何，较之以往，对此论题现有的这些理解是更为清晰了不少，我们在近一二年内将形成一本较为规范的专著，并已经提出了一个沿此无疑正确的方向进一步工作的清单[24]以备为之与时俱进达到一个更近理想的彼岸。

最后，谨引中国系统工程学会前理事长许国志院士生前最后一年撰写的一篇短文中如下的一段话为本文作结：

“科学的发展似乎(总)是由诸侯分治到统一江山，再开疆拓土，形成伟大的王朝。当欧基里得创建几何理论，阿拉伯人因通商发明了阿拉伯数字时，仅有诸侯，若干世纪后才出现了数学来统一江山，进而开疆拓土确立了伟大的数学王朝。”今天我们所面临的系统科学的发展亦复如此。20 世纪我们目睹并参与了从诸侯分治逐步渐进发展到初步的统一江山。这就是迄今为止国内外许多学者，在此共同领域内所获得的不同语言和形式实现的一些局部性统一的“总和”。在 21 世纪，我们必将看到它开疆拓土，建立新的伟大王朝。

有感于此，最近以来，我们经常细嚼这样的三则古训，即“天道崇简”、“大道如婴”、“天道酬勤”以及“天之道损有余而补不足，人之道损不足以奉有余”，故而提出天人和谐，即以“天道规范人道”的“天人合一”理念的内涵真意，现将此转呈所有有志于本领域学科的同行学者。相信只要沿着这几则古训的指引并心存大气(大气者，浩然正气之谓也)地做下去，即使是仅以我国学者群的已有成就为基础，按更高层次意义下的“从定性到定量综合集成”的方法论再下一番功夫，就能使我们的现有收获进入到某种更高境界却又不是那么“越说越复杂”的。

参考文献

[1] 钱学森：再谈系统科学的体系，《系统工程理论与实践》，Vol. 1，No. 1，1981

[2] 李国平，范文涛：系统的控制、滤波与识别，《系统工程》，1982 年

[3] 戴汝为：系统科学与复杂性科学，《系统科学与工程研究》，许国志主编，上海科技教育出版

社,2000年
[4] 范文涛:系统科学的形成与发展,《科学进展》,第一卷一期,1984年
[5] 许国志,顾基发,经士仁,范文涛(执笔):系统工程的回顾与展望,《系统工程理论与实践》,6期,1990年
[6] G. Y. Chen: and Q. M. Cheng, Vector Variational Inequality and Vector Optimization, Lecture Notes in Econ. and Math. Syst. Vol,285,1987
[7] G. Y. Chen, X. X. Huang and G. M. Lee: Equivalents of Approximate Variational Primciple for Vector-valued Functions, Mathematical Methods of Operations Research, Vol. 49, No. 1, 1999
[8] G. Y. Chen and X. Q. Yang: Characterizations of Variable Domination Structures via Nonlinear Scalarization, Journal of Optimization Theory and Applications, Vol. 112, No. 1, 2002
[9] 方福康,袁强:经济增长的复杂性与"J"结构,《系统工程理论与实践》, Vol. 22(2002), No. 10
[10] 方福康:复杂经济系统研究,《二十一世纪科学前沿》,宁夏人民出版社,1998年
[11] 范文涛,龚小庆,丁义明:建立系统科学基础理论框架的一种可能途径与若干具体思路(之一)——系统概念的历史发展与系统科学的产生,《系统工程理论与实践》,Vol. 22(2002), No. 2
[12] 范文涛,丁义明,龚小庆:同上(之二)——客观世界物质结构演化过程的统一图景与一种可补的系统科学基础理论框架思路,《系统工程理论与实践》,Vol. 22(2002), No. 3
[13] 范文涛,丁义明,龚小庆:同上(之三)——保守系的力学系统与最有控制系统的"等价性",《系统工程理论与实践》,Vol. 22(2002), No. 6
[14] 范文涛,丁义明,龚小庆:同上(之四)——从韦达定理与控制论到突变论、分歧、混沌、分形、耗散结构论、协同论以及与统计物理学的关系,《系统工程理论与实践》,Vol. 22(2002), No. 8
[15] 范文涛,丁义明,龚小庆:同上(之五)——物理学的理性原则与一般系统拉格朗日函数结构形式的推导,《系统工程理论与实践》,Vol. 22(2002), No. 10
[16] 范文涛,丁义明,龚小庆:同上(之六)——拉格朗日函数、作用量、最小作用量原理的物理意义与我国传统文化元典精神内涵的一致性,《系统工程理论与实践》,Vol. 22(2002), No. 12
[17] 范文涛,丁义明,龚小庆:同上(之七)——离散动力系统的密度演化与序列的信息结构,《系统工程理论与实践》,Vol. 22(2003), No. 5
[18] 龚小庆,范文涛,丁义明:同上(之八)——固定环境中的稳态涌现,《系统工程理论与实践》,Vol. 23(2003), No. 8
[19] 龚小庆,范文涛,丁义明:同上(之九)——博弈的演化分析,系统工程理论与实践,Vol. 23(2003), No. 9
[20] 范文涛,贾武,丁义明:同上(之十)——复杂网络上的自组织临界性模型,《系统工程理论与实践》,Vol. 25(2005), No. 12
[21] 范文涛,丁义明,龚小庆:同上(之十一)——非线性与信息的本质及其人本义以下的价值概念,《系统工程理论与实践》

[22] 范文涛,余旌胡,丁义明:同上(之十二)——广义的能量——Lyapunov 指数一熵 Hausdorff 维数概念间的关系,《系统工程理论与实践》

[23] 范文涛:同上(之十三)——关于量子化的普适性与复相空间的一些讨论与注记,《系统工程理论与实践》

[24] 中国系统工程学会 2005～2020 年度系统科学与系统工程学科发展规划(范文涛执笔)

[25] Minoru Kanehisa:《后基因组信息学》(孙之荣译,天津大学出版社,清华大学出版社,2000)

[26] 罗辽复:《生命进化的物理观》,上海科学技术出版社,2000 年

[27] P. Erdos and A. Renyi: On the evolution of random graphs, Publ. Math. Inst. Hung. Acad. Sci., 5, 1960

[28] D. J. Watts and S. H. Strogatz: Collective dynamics of "small word" networks, Nature, 393, 1998

[29] X. F. Wang(汪小帆)and G. Chen(陈关荣): Complex networks: Small-world, scale-free and beyond, IEEE, Circuits and Systems Magazine, 3(1), 2003

[31] 陆君安,吕金虎,陈士华:Chen 混沌吸引子及其特征量,《控制理论与应用》,2002,19(2)

[32] 范文涛:系统科学与数理科学的关系,《系统工程》,1987 年,第 3 卷第 2 期

[33] 范文涛:从物理学到事理学的一些浅见,《系统工程理论与实践》,1988 年第 3 期

[34] 范文涛:《复杂系统演化理论与方法研究》序,浙江大学出版社,2005 年

简单巨系统演化理论

姜　璐
北京师范大学管理学院，北京，100875

一、四类系统构建系统科学理论框架

钱老提出系统科学研究的对象可以分成简单系统、简单巨系统、复杂适应性系统、开放的复杂巨系统四类。四类系统实际上是系统科学研究的四个模型，它从系统科学的层面把当前科学研究的前沿内容全部概括进去。

上世纪 70 年代开始形成了探索复杂性的欧洲学派，比利时化学家普利高津和德国物理学家哈肯在原来非平衡统计物理的基础上，研究多粒子体系的复杂性质，提出了耗散结构理论和协同学[1,2]，从宏观和随机两个层次研究了系统从均匀的平衡态向有序的稳定结构演化的可能性以及条件，并且运用微分方程数学模型描写系统演化，采用定性理论分析给出系统演化的具体结果，成为当时科学发展的前沿。钱老十分关注他们的研究成果，并且敏锐地觉察到这些研究与以前按照牛顿力学体系、从还原论的角度进行研究的所有线性理论不同，认为普利高津、哈肯等人的研究成果很重要。在 20 世纪 80 年代系统学讨论班上，钱老多次组织研讨欧洲学派的研究成果，提出要以他们的研究成果作为构建系统学的重要材料；同时指出，这些理论只是探讨了简单巨系统的演化规律，对于更复杂的系统，这些理论是不适用的。钱老将耗散结构理论和协同学等定位在简单巨系统的层面上，为具体构建系统学打下了基础。

上世纪 80 年代开始，诺贝尔物理学奖获得者安德森、盖尔曼，经济学奖获得者阿诺等人在美国的新墨西哥州阿拉莫斯建立了圣菲研究所(Santa Fe Institute)进行跨学科研究[3,4]，研究大量具有学习功能、可以适应环境的子系统组成的系统的整体性质，他们针对这类系统的演化特点，提出了适应性造就复杂性的思想，归纳了诸如聚集、标识等描述系统状态及演化机制的几个概念，并创立了一套计算机算法(SWAM 平台)[5]，他们企图用此来作为研究所有复杂系统，特别是社会复杂系统的基础。对此，钱老指出：圣非研究所的专家们研究的对象只是复杂适应性系统，他们的理论对像生物、人体、环境等系统是适用的，但是依靠这些理论来研究社会系统是不够的，社会系统还应该选择更复杂的模型，当然圣非研究所研究的对象要比简

单巨系统复杂，它的复杂性就在于每一个子系统都具有学习的功能，它能适应环境。

钱老认为对于社会系统的研究应该建立更复杂的系统模型，应该有更加科学的研究方法，当前世界上还没有人从系统科学的角度系统地研究这类复杂系统，根据这类系统要与环境进行充分的物质、能量，特别是信息的交流，钱老将它命名为开放的复杂巨系统[6]，而且组织人力进行研究，针对这类系统的开放性，钱老提出应该采用人机对话的数学手段来进行讨论。从20世纪90年代开始，钱老亲自对此类系统进行研究，并且在方法论的层面上提出了一套行之有效的方法——从定性到定量的综合集成方法[7]。

这样，钱老从系统科学的高度构建了系统学的大纲。我认为，在经典科学的力学体系中，人们建立了质点模型、刚体模型、弹性体模型、流体模型等，并建立了相应的质点力学（包括质点组力学）、刚体力学、弹性力学（包括塑性力学、断裂力学）、流体力学等，这些不同模型及演化规律组成了力学。钱老在系统科学里也建立了若干模型（如前述的简单系统、简单巨系统、复杂适应性系统、开放的复杂巨系统），针对每一类模型提出模型特点、重要概念、基本特性、采用的数学方法等内容，将它们综合起来，就构成了系统学的内容。

二、简单巨系统演化理论是系统学的具体内容

钱老在20世纪末提出了系统学的理论框架，我们的任务，或者说当前的主要工作就是在钱老给定的体系下，分门别类的对各类系统模型进行研究，提出并建立相应的理论。我所编著的《简单巨系统演化理论》就是在这种思想指导下，对比较简单的系统用系统科学的思想进行讨论[8]。按照我对钱老思想的理解，我对简单巨系统模型的讨论，是以普利高津、哈肯的自组织理论作为理论素材，但我们所要建立的不是关于自组织理论的教材，也不是物理的教材，而是按照钱老系统科学的体系来进行组织的。我从简单巨系统模型特点的描述、建立模型所依据的实验现象、模型中出现的主要概念、分析模型采用的数学方法、手段、得到的主要结论，以及对模型的具体应用等几个层次来展开。在书中我特别对简单巨系统如何应用熵概念均作了详细的解释，在这些具体问题上，还与钱老进行了交流，他对我的想法进行了肯定，还讲述了他自己对熵概念的理解。这些更加深了我将熵概念作为简单巨系统主要概念的信心[9]。

鉴于描述简单巨系统演化主要用微分方程，我在书中把微分方程作为研究系统演化规律的主要方法，把微分方程定性理论，特别是它与系统演化的关系作为主要内容进行了讨论；同时把力学中处理非线性问题的微扰理论及适用条件，把在处理生态系统非线性演化的平均值方法，把我们在处理物理问题时采用的算子分析方法，还有数学上的突变论等，全都作为分析简单巨系统演化的数学方法综合在一起，

完成了对简单巨系统演化理论的数学方法内容。

在系统学讨论班上，钱老希望我们帮助他完成构建系统学的任务，我认为自己应该并能够贡献的力量，就是按照钱老的思想对简单巨系统演化规律进行分析，《简单巨系统演化理论》一书的完成可以看成是我对钱老系统科学理论理解的具体体现。

三、遵从钱老的思想构建系统学

我在按钱老思想试着将简单巨系统演化理论总结出来的过程中，很多地方都是在主动认真学习钱老的科学思想才得以完成的。我所体会较深刻的地方在于：

(1) 总结科学理论主要的目的是为了应用，而不能仅停留在欣赏理论的"完美"、"自洽"上。我是研究理论物理出身的，比较多的时间花在了对系统演化的分析计算上，不太重视，或者说不知道怎样应用。我参加了钱老组织的系统学讨论班活动，钱老几次强调研究自然科学理论是为了应用。混沌是 20 世纪 80 年代在我国大范围开展研究的课题，不少学术论文都是从一个个数学迭代出发，从一组组实际的数据出发，计算系统的混沌现象、计算各种系数等等。我也曾与他们一样，作过一些工作，但从来没有想过应用，哪怕是一些最简单的应用。钱老在讨论班上讲，"混沌是非线性系统演化中出现的一种不确定性，认识了这类现象对我们非常有用"。实际上，通过研究我们可以发现，在短时间区间，我们完全可以把混沌现象当成确定性问题处理，用确定性的方程计算、预测系统演化的结果，这与以前在处理完全确定性的问题没有什么区别；在特别长的时间区间，系统演化经过了各种可能性，我们又可以认为它经历了各种可能的状态，用完全随机的办法来处理它的演化行为；实际上只是在系统刚刚进入混沌状态的时候，讨论起来最困难。这时，系统已经不再是确定性的了，原来的确定性方法不能应用；因为系统还未实现各态历经，随机的方法也不能应用。这也正是混沌现象所揭示出来的，在系统演化过程中出现的新的特点。钱老指出对于混沌现象的这种特点，我们科学工作者的任务之一就是要避免这种情况的出现。记得在一次系统学讨论班上，国家气象研究院叶笃正院长报告后，钱老诚恳地给叶老科研方向提建议，他指出世界气象学界应该充分利用确定性的方法，在一天、两天内的短期天气预报的准确性上下工夫，力争得到更准确的小范围的气象预报，以适应各项事业的发展；还要利用随机理论的方法，考虑各项随机因素的影响，加强对中长期天气趋势的预报；而不必花大精力在十天左右的天气预报的研究，因为这时系统已经进入混沌区，研究将十分困难。叶老十分感慨，认为这是对气象学界研究方向非常重要的建议。钱老在混沌问题的研究中提出形成混沌的时间常数问题，并且提出短时间区域采用确定性方法，在长时间区域采用随机方法，同时避开形成混沌的时间区域。我感觉钱老对混沌现象能提出形成时间问题，并且用来指

导实际应用，很多专门研究混沌的专家也没有注意到，他们把对自然科学的研究仅仅停留在探索规律上。钱老处处想到实际应用，告诉我们，认识客观世界的目的就在于利用客观世界来为我们服务。在我讲解到混沌现象时，特意提出这一问题，引起学生的注意，使他们将来工作时，能主动地进行应用，避免纯理论的研究。

(2) 科学理论是发展的，不存在终极的、一成不变的理论，这在钱老关于科学技术分类上体现得特别突出。1986 年钱老将世界上的科学技术分成 9 大学科部类，它们是数学、自然科学、系统科学、人体科学、思维科学、行为科学、社会科学、军事科学、文学艺术[10]。从这 9 大学科部类的分类上可以看出，研究比较成熟的内容，学科分类设置就比较综合，比如自然科学，它包含了物理学、化学、生物学等很多内容；而这时对人体的研究还不很成熟，钱老在科学分类上就提出了人体科学、思维科学、行为科学等三个学科部类，它们分别研究人体本身、大脑活动、人类集体三个不同的侧面。同时钱老还指出这种分类是一个时期经验的概括和总结，随着科学的发展、人类认识的深化，可能还会发生变化。过了几年，钱老根据科学的发展，又提出了地理科学、建筑科学两个新的学科部类，形成了共十一个学科部类。这种不断创新、不断否定过去、不断发展的科学研究精神，特别值得我们学习。科学本来就是一个不断完善、不断深入、不断发展的过程，一个人在科学研究上只能做自己所能做的一小步工作，这一小步工作也要随着时间的推移，不断改正自己的错误；随着实验上新的发现，不断修正自己的理论。

(3) 建立系统科学的理论就要像建立自然科学体系一样，既要讨论模型，也要研究实际问题，而且要处理好它们两者之间的关系。我在按照钱老思想编著《简单巨系统演化理论》一书的过程中，特别注意对实际问题的应用，全书用一章来讨论实际应用问题。在解决实际问题时，由于客观实际问题是复杂的，而模型是规范的。简单巨系统在解决实际问题时，首先要把实际问题化成简单巨系统的模型，然后在模型的框架内予以解决。记得在上世纪 80 年代，我在系统学讨论班上报告哈肯协同学对社会系统如舆论形成、人口增长、经济周期等问题时，钱老启发我认识到协同学理论属于简单巨系统理论，它不可能完全解决复杂的社会系统的演化问题，对这些问题的解决必须要依赖开放的复杂巨系统模型，必须要把子系统看成具有活力的复杂系统，认为它们之间存在非线性相互作用才成，讨论系统整体的演化行为必须要利用综合集成的方法，采用人机对话的研讨厅系统才能进行解决。当然，我们进行若干假设，使之满足简单巨系统模型的要求，对它们也能在简单巨系统的框架内加以讨论，对问题作一个大致的说明。哈肯正是不自觉地按照钱老的思想在作了大量的假定以后，把实际的社会问题简化成每一个子系统(个人)全像一个个全同的理想气体分子一样，并采用简单巨系统理论中用微分方程描述其整体演化规律进行讨论，得出了一些结论，这些结论在承认所采用的假定下，是完全正确的。这样认识并对待简单巨系统理论讨论社会问题，是对盲目夸大一种理论的正确性，随便扩大使

用范围，或者是不敢于对实际问题进行讨论，两种错误倾向的否定，也是正确运用理论解决实际问题的方法。

总之，自 20 世纪 80 年代以来，钱老致力于系统学的研究，给我们提出了一个可供研究的框架提出了构建系统学的若干思想，并身体力行，对最复杂的社会系统（开放的复杂巨系统）进行了讨论。钱老的工作推动了我国系统科学的研究，并使我们能走在世界的前列。我作为一名教师，作为一名系统科学的教师，作为一名曾多次听过钱老教诲的后辈，我有责任教育我的学生，使他们也能学到钱老的思想，为完成系统学的构建而继续工作，通过我国科学工作者一代一代不断的努力，使钱老开创的系统学研究在中国获得巨大的成功。

参 考 文 献

[1] 尼科利斯 G.，普利高津 I.：《非平衡系统中的自组织》，徐锡申等译，科学出版社，1986 年
[2] 哈肯 H.：《高等协同学》，郭治安译，科学出版社，1987 年
[3] 霍兰 J. H：《隐秩序》，周晓牧等译，上海科学技术出版社，2000 年
[4] Holland J. H. Emergence，Addison-Wesley，1998
[5] 许国志主编：《系统科学》第八章，上海科技出版社，2000 年
[6] 王寿云等：《开放的复杂巨系统》，浙江教育出版社，1996 年
[7] 钱学森等：一个科学领域——开放的复杂巨系统及其方法论，《自然杂志》1990 年 1 期
[8] 姜璐，李克强：《简单巨系统演化理论》，北京师范大学出版社，1999 年
[9] 姜璐：《熵——系统科学的基本概念》，沈阳出版社，1995 年
[10] 许国志主编：《系统研究》，浙江教育出版社，1996 年

地理系统工程研究

马蔼乃

北京大学地球与空间科学学院，北京，100871

地理系统工程是地理科学在工程层次上的学科。地理系统工程包括人口系统、城镇系统、基础设施系统、产业系统、资源系统、生态系统、环境系统、灾害系统等8个子系统。而各个子系统又有多层次的子系统，因此地理系统是一个开放的复杂巨系统[1~4]，地理系统工程同时又是物质文明、政治文明、精神文明的基础，也是可持续发展战略的基础。本文简要讨论现今的开放复杂巨系统的概念、生产力发展规律[5,6]、天地人机信息一体化网络系统[7,8]、地理复杂模型和地理系统工程[9,10]五个问题。

一、开放的复杂巨系统

当今开放的复杂巨系统的概念已经有所发展，根据笔者的研究可用下式表示[1]：

$$\boxed{CS = f\left(\sum_{i=1}^{n} I_i, R[r]_{ij}, s, t\right)} \overset{B}{\underset{F}{\Leftrightarrow}} E \tag{1}$$

式中：

(1) Complex System，CS 表示复杂**系统**，具有整体性，整体大于部分之和；具有涌现性，非加和性；系统是进化发展的；有周期性而没有重复性，有相似性而没有相等性。

(2) Ingredient set 表示**因素**集合，$\sum_{i=1}^{n} I_i$ 因素可以是子系统，子系统又是多层次的。

(3) Relation set 表示因素(或子系统)之间的**关系**集合，$R[r]_{ij}$ 为网络关系，可用矩阵表示，其中尤为重要的是反馈控制，反馈的方式是多回路的。

(4) spatial 表示**空间**(x，y，z)系统在空间呈一定的分布状态。

(5) temporal 表示**时间**，系统是随时间演化的，演化的状态就是系统的过程。

（6）f()表示系统的**结构**(Structure)，系统中的时间、空间、因素、关系组成系统的结构。

（7）[虚线框]表示系统的**边界**(Boundary)，系统在时间上有时限，在空间上有空域，虚线表示开放系统。

（8）Environment 表示系统边界以外的**环境**，指与该系统有交互作用的环境。

（9）Behavior 表示系统在环境中的**行为**，反映环境对系统的影响。

（10）Function 表示系统的**功能**，反映系统对环境的作用。

（11）⇔表示系统与环境的交互输入、输出的关系(Mutual Input and Output)，不是逻辑运算中的"等价于"，或者充要条件，请读者注意！

上述 11 个要素是一个完整的开放复杂巨系统所必备的条件，研究系统工程，从总系统到各个子系统，都需要具备系统的 11 个因素，系统与环境之间具有互反馈的效应。

开放的、复杂巨系统一般是网络结构的。开放的复杂巨系统比简单系统来说有以下的特点：(1)系统中的因素是子系统，子系统的数目足够大，层次足够多，难以用现有简单性科学中的状态方程所表述，需要用专业的复杂性方程表述，地理科学中用地理复杂性模型；(2)每个子系统与整体系统之间没有相同的"全息性"，子系统之间与整体系统之间可以具有相似性，需要用相似准则表示，有些相似准则是共通的；(3)子系统之间相互作用呈动态地变化；(4)相互作用一般是非线性的，特殊情况下是线性的；(5)子系统之间同时具有确定与不确定的关系(不确定包括随机不确定、模糊不确定、灰色不确定、分形不确定)；(6)子系统仅与邻近的子系统相互发生作用，作用是传递性的；(7)子系统相互作用时，存在多条反馈线路，不仅只有一条线路；(8)复杂系统的边界是开放的、随机的、模糊的、灰色的；(9)复杂系统是不平衡、不稳定、不对称的，耗散结构理论不能完全解决复杂系统的问题；(10)复杂系统具有传承性，过去的系统状态、结构、功能都会影响现在的系统状态、结构与功能。

地理系统是开放的、复杂的、网络的巨系统。构建天地人机信息一体化网络系统和地理系统工程时，必须关注开放的复杂巨系统的特点。

二、生产力发展规律

生产力发展的规律见图 1、2、3。

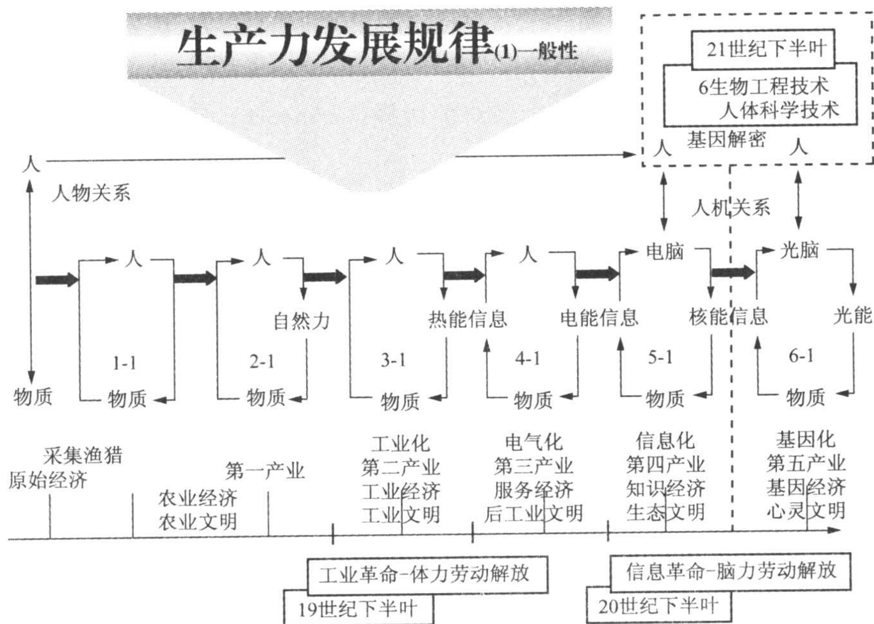


图 1　生产力发展一般规律

Fig. 1　Development laws of productivity

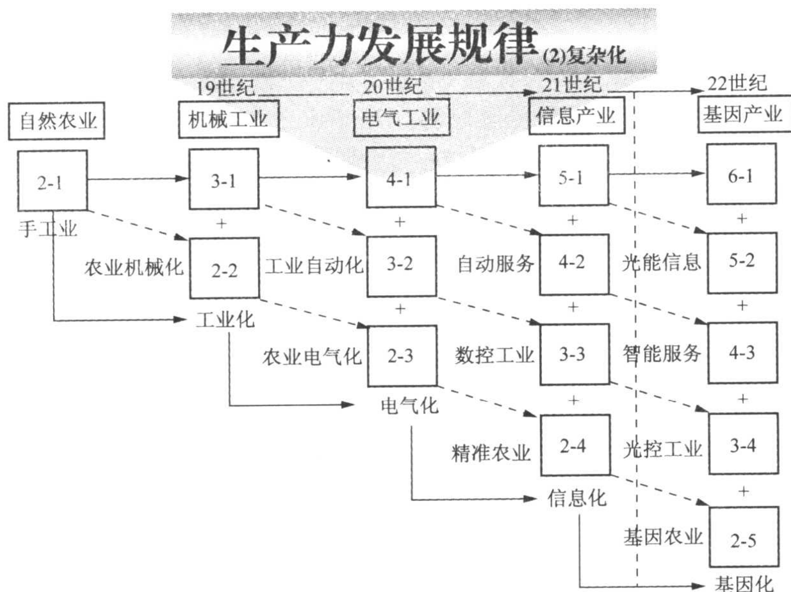


图 2　生产力发展的复杂性

Fig. 2　Complex development laws of productivity

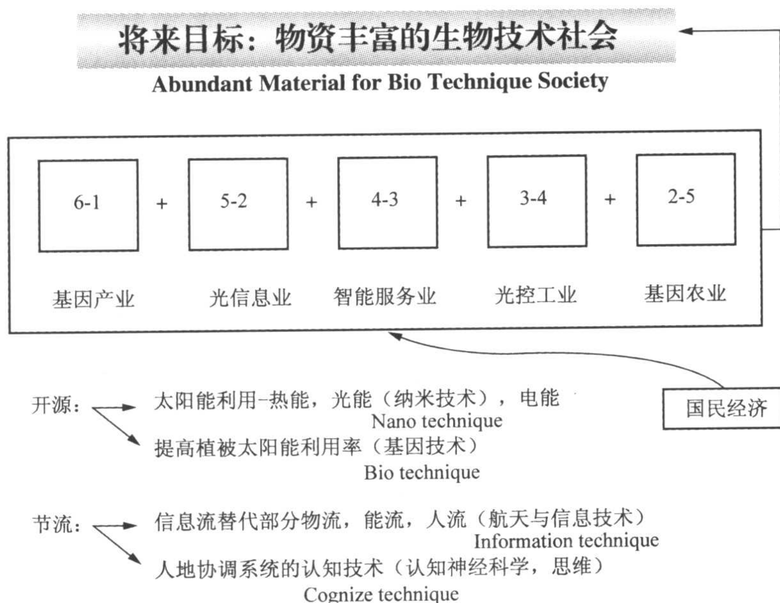


图 3　信息社会到生物技术社会

Fig. 3　Form information to bio-technique society

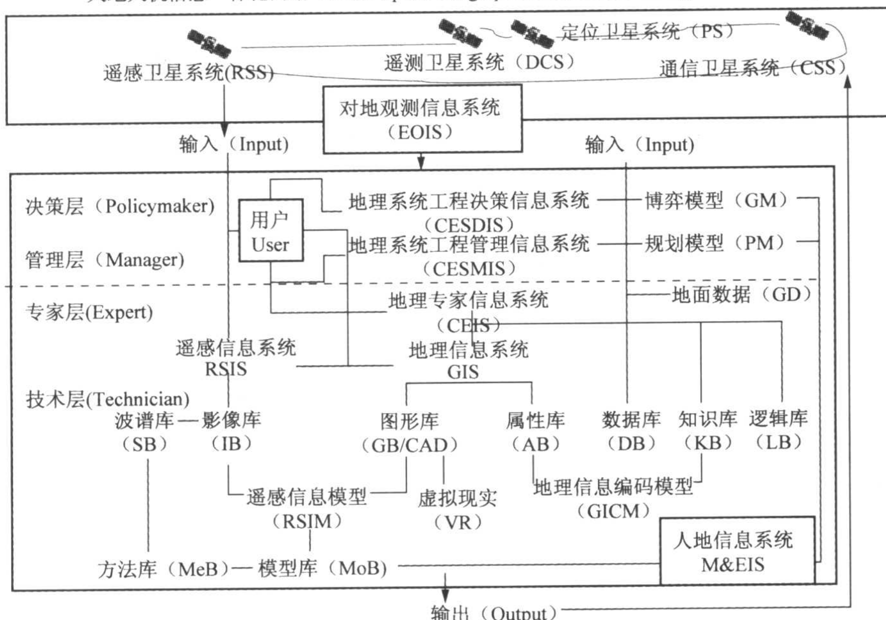


图 4　介于自然科学与社会科学之间的技术

Fig. 4　the Technology Between Natural and Social Sciences

图 1、图 2、图 3 说明了生产力发展的规律，以及当今社会所处的时代，图 3 中表述了当前的带头学科为纳米、基因、信息和认知科学与技术，即所谓的 NBIC。现代的科学技术“只有没有认识的问题，没有做不到的问题”、“只要认识到了，纳米技术就可以做到，基因技术就可以应用，信息技术就可以监测”。

三、天地人机信息一体化网络系统

天地人机信息一体化网络系统，是在航天技术，计算机技术的基础上发展起来的，介于自然科学与社会科学之间的技术，见图 4。图中遥感信息系统、地理信息系统、专家信息系统，是自然科学与技术；管理信息系统与辅助决策系统是社会科学与技术。

四、地理信息复杂模型

地理信息复杂模型是在卫星遥感、遥测、定位、通讯的航天技术获取的信息，使用计算机对每一个像元或者图斑进行计算的模型，集物理方程（演绎逻辑）、数理统计（归纳逻辑）、相似准则（类比逻辑）为一体，从形式逻辑发展到辩证逻辑的模型计算。其表达式见图 5。

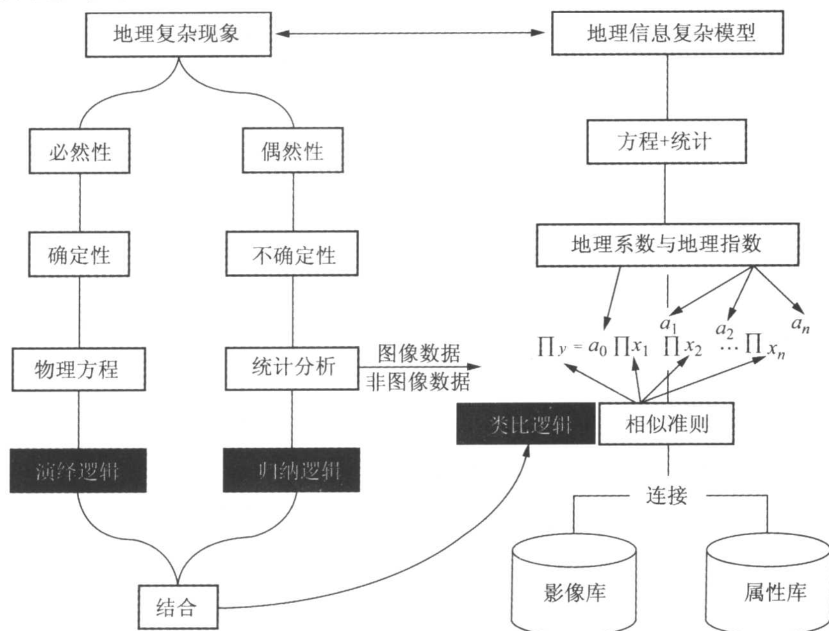


图 5 地理复杂模型的概念

Fig. 5 the Concept of Geographical Complex Model

在图 4 中遥感信息模型(RSIM)所在的位置，就是地理复杂信息模型，除了地理复杂信息模型之外，还有一个地理信息编码模型(GICM)与之对应。地理复杂模型中的数据、相似准则 π_y，π_x、地理系数 $a_0=f(x,y,z,t,\pi_{x3}{}^{a^3}\cdots\pi_{x_{n-1}}{}^{a_{n-1}}$、地理指数 a_1，a_2，…，a_n 都需要编码，依次存放，以便计算时方便使用。

五、地理系统工程

地理系统依照公式(1)的形式，可以写为(2)式：

$$
CS = f_G\left(\sum_{i=1}^{8} I_i, R\begin{bmatrix} r_{11}r_{12}r_{13}r_{14}r_{15}r_{16}r_{17}r_{18} \\ r_{21}r_{22}r_{23}r_{24}r_{25}r_{26}r_{27}r_{28} \\ r_{31}r_{32}r_{33}r_{34}r_{35}r_{36}r_{37}r_{38} \\ r_{41}r_{42}r_{43}r_{44}r_{45}r_{46}r_{47}r_{48} \\ r_{51}r_{52}r_{53}r_{54}r_{55}r_{56}r_{57}r_{58} \\ r_{61}r_{62}r_{63}r_{64}r_{65}r_{66}r_{67}r_{68} \\ r_{71}r_{72}r_{73}r_{74}r_{75}r_{76}r_{77}r_{78} \\ r_{81}r_{82}r_{83}r_{84}r_{85}r_{86}r_{87}r_{88} \end{bmatrix}, s, t\right) \Leftrightarrow E\ (SS) \quad (2)
$$

B

F

其中 GS 为地理系统；

$\sum_{i=1}^{8} I_i$ 为 8 个子系统，这里需要说明借用 $\sum_{i=1}^{n} I$ 代表相互依赖的子系统，不是原来数学中的连加符号，正像用 π 来表示地理相似准则一样，$\sum_{i=1}^{n} I$ 也是地理数学选用的符号，请读者注意，后续各章中的含义，也不再重复；

$$
R\begin{bmatrix} r_{11}r_{12}r_{13}r_{14}r_{15}r_{16}r_{17}r_{18} \\ r_{21}r_{22}r_{23}r_{24}r_{25}r_{26}r_{27}r_{28} \\ r_{31}r_{32}r_{33}r_{34}r_{35}r_{36}r_{37}r_{38} \\ r_{41}r_{42}r_{43}r_{44}r_{45}r_{46}r_{47}r_{48} \\ r_{51}r_{52}r_{53}r_{54}r_{55}r_{56}r_{57}r_{58} \\ r_{61}r_{62}r_{63}r_{64}r_{65}r_{66}r_{67}r_{68} \\ r_{71}r_{72}r_{73}r_{74}r_{75}r_{76}r_{77}r_{78} \\ r_{81}r_{82}r_{83}r_{84}r_{85}r_{86}r_{87}r_{88} \end{bmatrix}
$$

为 8 个子系统之间的矩阵关系；

8 个子系统之间的 $r_{11}=r_{22}=r_{33}=r_{44}=r_{55}=r_{66}=r_{77}=r_{88}=1$ 为自相关，分别为人口、资源、生态、环境、灾害、城镇、基建、产业；而且 $r_{12}=r_{21}$、…、$r_{18}=r_{81}$；$r_{23}=r_{32}$、…、$r_{28}=r_{82}$；$r_{34}=r_{43}$、…、$r_{38}=r_{83}$；$r_{45}=r_{54}$、…、$r_{48}=r_{84}$；$r_{56}=r_{65}$、…、$r_{58}=r_{85}$；$r_{67}=r_{76}$、$r_{68}=$

r_{86}；$r_{78}=r_{87}$；由此可见，8 个系统中只有 28 种关系是主要关系；

$f_G()$为地理系统的结构，见地理系统工程的结构；

$E(SS)$为地理系统的环境，即社会系统，社会系统是开放的特殊复杂的巨系统；

其他的 s、t、B、F、[illegible]与(1)式含义相同。

地理系统工程组成的结构中，核心问题是**人口**($r_1=p$)，人口的生活需要有居住地，居住地构成**城镇**($r_6=c$)体系（中国现行市管县的制度，包括农村），城镇体系的内部与外部都需要**基础设施**($r_7=e_3$)的建设，城镇与基建需要开发和利用**资源**($r_2=r$)，人口就业需要参加**产业**($r_8=i$)的经济建设，经济生产包括资源开发利用、劳动力配置、资金与技术的投入、企业管理等，人口在生产与生活中会产生废物，造成**环境**($r_4=e_2$)问题，环境影响**生态**($r_3=e_1$)系统的失衡，环境与生态引起人工**灾害**($r_5=d$)，加之自然灾害构成人类社会生存的危害。按照地理系统 5-1 式，可见 8 个系统两两之间的关系，因此形象的地理系统工程可见图 6。

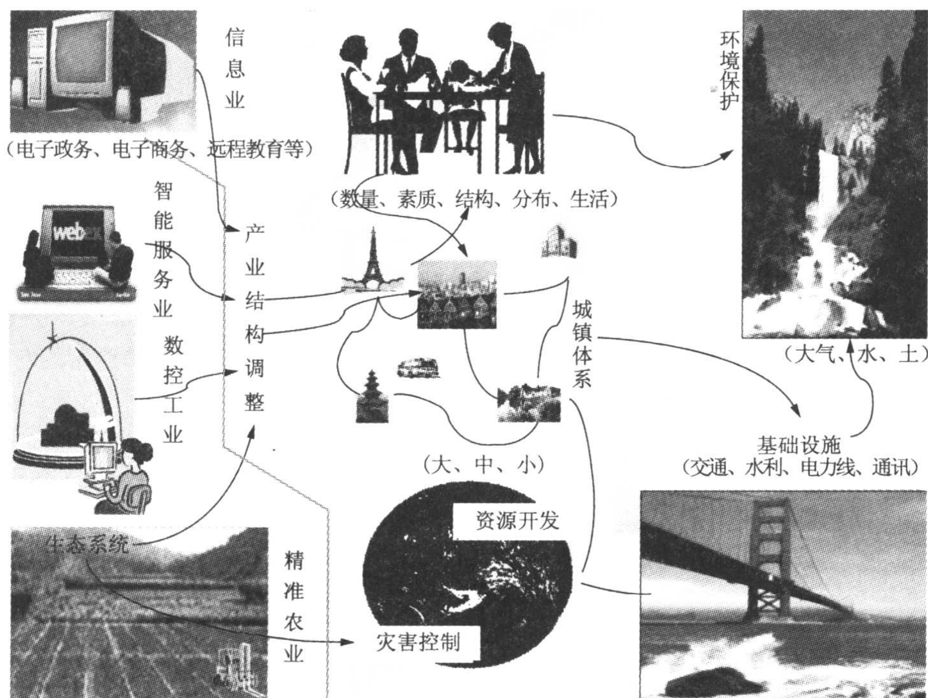


图 6　地理系统工程框架图

Fig. 6　Frame of Geographical Systems Engineering

参 考 文 献

[1] 钱学森:创建系统学[M],太原,山西科学技术出版社,2001

[2] 王寿云等:开放的复杂巨系统[M],杭州,浙江科学技术出版社,1996

[3] 许国志主编:系统科学[M],上海:上海科技教育出版社,2000

[4] 许国志主编:系统科学与工程研究[M],上海科技教育出版社,2000

[5] 钱学敏:地理系统和社会系统[J],开放的复杂巨系统[M],杭州:浙江科学技术出版社,1996,226—227

[6] 马蔼乃:长江地区可持续发展战略[M],武汉,武汉出版社,1999

[7] 马蔼乃:航天信息与地理信息一体化网络系统及其应用[J],北京大学学报(自然科学版),1998

[8] 马蔼乃:地理信息科学——天地人机一体化网络系统[M],北京,高教出版社,2005

[9] 马蔼乃:遥感信息模型[M],北京,北京大学出版社,1997

[10] 马蔼乃:地理科学导论——自然科学与社会科学的桥梁科学,北京,高教出版社,2005

创建知识系统工程学科

王众托
大连理工大学，大连，116024

钱学森教授是中国系统科学与系统工程事业的开创人与引路人，在他的领导和指引下，我国系统工程在实践和理论上都取得了辉煌的成就；在系统科学的发展、特别是系统学的开创方面，做出了创造性的贡献[1]。早在20世纪80年代，他就提出开展思维科学的研究[2]，并提出要用思维科学成果来研究开放的复杂巨系统问题，把综合集成看作是思维科学的应用技术，使思维科学的发展以应用为依托，取得了实际成效。

他所倡导的将系统科学与思维科学结合起来进行跨学科研究的思想，指引我们在研究知识管理和创新的过程中，运用系统工程与思维科学的理念和方法论，提出创建"知识系统工程"学科分支，来具体处理知识的应用和创新问题，几年来通过构建学科框架和进行应用开发的实践，取得初步的进展。在工作中深刻体会到他的系统科学与思维科学的高度影响力和前瞻性。

一、知识经济与知识管理

最近几年来，无论是在国外还是国内，都引起了研究讨论知识经济的热潮。知识经济是建立在知识的创新、传播和使用基础上的经济，是继农业经济、工业经济之后的一个新的经济发展阶段，它将引起生产方式、生活方式以至于思维方式的重大改革。

当今人类社会步入了一个经济结构加快调整的重要时期，科技竞争已成为国际综合实力竞争的焦点。科技进步促进了经济的发展，而经济反过来又推动科技进步，两者相互作用，促成知识经济的产生和发展。知识已经从书斋和实验室走入经济生活，成为重要的经济资源、生产要素和资本。

我国近年来保持了较快的经济增长速度，社会财富不断增加，但经济结构不够合理，粗放型的增长方式与有限的自然资源成为制约我国国民经济和社会持续健康发展的瓶颈。为了克服这些制约，必须走科技含量高、经济效益好、资源消耗低、环境污染少、人力资源得到充分发挥的新型工业化道路，因而不能不关注知识经济。我们应该不失时机地加强对知识经济的研究，提高认识，探索规律，并寻找适合我国

国情的发展途径。除了重视高新技术类的知识产业的发展和传统产业的改造外，更应该全面研究在包括现有的和未来的各行各业在内的整个经济生活中知识的作用，在扶植创建新的知识力量的同时，挖掘和动员已有的知识资源，加以充分利用，以提高综合国力。

如果说过去在长期的生产过程中人们是不自觉地点滴累积并利用各种知识的，那么到了知识经济阶段，一方面技术知识在不断地增加和深化，它的作用也愈来愈大，另一方面由于分工和专业化程度的提高，制度知识也在不断地发展。人们需要更加自觉地认识和发挥知识的作用，因此，知识作为一种资源，作为一种生产要素，作为一种资本，对于它的管理需要专门加以研究。

长久以来，随着知识应用的日益广泛，人们已经自觉不自觉地在组织和管理知识。对那些有固定形式的知识，如技术文化资料、图纸、专利等能自觉地加以管理，而对一些无形的、特别是潜在的知识，则常常未予重视，甚至有时会损害或妨碍知识的获取、传播和应用。因此，把知识管理作为一个重要的任务提出来是有现实意义的。

在经济发展的现阶段，自然资源的优势已不再成为经济增长的关键，而知识资源的作用却日益显示出其重要性，因为它还能促使有限的自然资源得到更合理和充分的利用。人的智力资源是取之不尽、用之不竭的，越开发越多。如何开发利用这种特殊的资源，其组织管理是一个崭新的课题。

由于知识是一种无形资产，所以它的管理远比有形物资管理来得复杂。特别是只可意会不可言传的隐性知识存在于人的头脑之中，人员流动又会造成知识的散失。如何使创新集体中每个人的知识都能与其他人沟通共享，形成组织（集体）所掌握的知识，是一个非常复杂的组织行为和社会过程。传统的管理思想和模式在这里是不适用的，需要另辟蹊径。

近年来，关于知识管理的研究，是沿着两条主线进行的：一条是把重点放在信息管理上，因为信息是知识的载体，通过对信息内容和信息工具的管理来实现知识管理。从事这方面工作的大都是具有信息技术与计算机专业背景的，他们致力于信息系统、人工智能等工具方面的应用。另一条主线则是把重点放在人的管理上，研究者大都是具有社会科学与人文科学专业背景的人，他们着重研究人和组织的行为和思维方式。

由于知识管理的高度复杂性以及跨学科特点，知识管理兼有技术与人文两种属性，而且两种属性是交互作用的，因此，沿上述两条主线中的某一条进行研究，对于某些具体过程可以取得成果，但缺少从总体上的把握。 如果利用系统方法来从整体上加以分析和综合，就能更全面和深入地考虑各种因素及其相互影响。尤其是现代系统科学与系统工程对复杂系统的研究思路和方法，可以作为知识管理的犀利武器。

二、知识系统工程

按照钱学森和许国志教授的说法，系统工程是关于组织、管理的技术，知识需要管理，而知识的生产、传播与利用又形成了一个系统，那么是否可以考虑把知识系统的研究提到系统工程的高度，建立系统工程的一个新的学科分支，来进行研究呢？

在研究和解决系统工程应用问题时，既可以按照行业来建立分支，如农业系统工程、航天系统工程等，也可以按照一些共性对象如物资、能源、信息来建立分支。

对于能源进行系统性研究，可以建立能源系统工程这样一个领域，尽管能源的生产、输送、转换与利用属于不同行业，包括煤炭、石油、核能、电力、运输等行业，但是从一个统一的观点跨领域加以研究，有利于对能源的有效综合利用进行统筹规划、运行和管理。我国在 20 世纪的 80 年代初，系统工程界建立了能源系统工程学科，用系统工程思想与方法研究了我国能源从资源开发、加工、运输与综合利用、节能的战略与规划，向政府提出了许多建议，取得很好的效果。

对信息进行系统性研究，可以建立信息系统工程这样一个领域，对信息的获取、传输、加工与利用进行统筹规划、运行和管理，特别是现代的信息技术是由计算机技术与通信技术有机结合而形成的，信息网络正在进行通信网、电视网与数据网的三网合一，用信息系统工程的观点来处理问题更是发展的需要。我国的信息技术及其应用的大发展，正是沿着这样的思路前进的。

现在物流系统也在应用系统工程的原理与方法来建立自己的学科体系。

同样为知识系统建立这样一个新领域：知识系统工程，对知识管理、对知识经济的研究，将开拓一条新的途径。因此在上一世纪末，我们就提出了建立知识系统工程的倡议[3,4]。

沿袭系统工程的一般定义，我们可以把知识系统工程定义为："知识系统工程是对知识进行组织管理的技术。"

知识管理系统是一个复杂的人-机系统，其中人的因素所占比重很大，特别是涉及人的思维活动，现在还难以精确描述与分析。以计算机为核心的信息系统起到采集、传输、存贮处理以及协助人们沟通和深化思维的作用。它和管理物流、能流、资金流的系统有很大的差别，与管理信息流的系统有一定的共同之处，但也有差别。所以应该根据各自的特点，建立自己的思路和方法。

这里所说的知识系统，其含义与内容要比人工智能中的基于知识的系统(Knowledge-based system)广泛得多，因为其中包含了具有主动性和创造性的人在内。后者可以看作是前者的一种工具、一类子系统。

按照系统工程的观点，系统是由许多要素组成的整体；要素之间，要素与整体之间，整体与环境之间存在着有机联系；系统具有整体功能；系统是有层次的；系统的

存在与发展必须适应环境[5]。

对一个组织(企业、院所等)的知识系统来说,系统中的要素就是存在于文件、手册、图纸中的知识,存在于人的头脑中的知识和已经凝聚在产品、工作过程、经营管理制度和方法等之中的知识。这些知识按来源、用途有着各式各样的有机联系。

系统工程强调实践性,知识系统整体功能是支持知识主体的存在和发展,对国家来说是提高创新能力,增强综合国力,对企业来说是提高企业的竞争力。知识系统是随着社会经济、文化生活的发展而产生和发展的,要不断更新以适应社会需要。

按层次来说,知识系统可以分为宏观和微观两层。宏观知识系统是一个国家的知识系统,微观知识系统是一个组织(企业、院所等)的知识系统。微观系统是宏观系统的有机组成部分。

知识系统工程可以吸取传统的系统工程的思想、方法、工具体系,来研究宏观与微观知识系统的目标、功能、结构,以及系统的规划、设计、建立和运作,但要研究许多新问题。这方面有许多工作可做,特别要从当前的实践中提炼带规律性的东西。

按照系统工程的思路,我们可以从系统的结构和功能来对知识系统加以考察。系统的结构一般说来是由系统功能确定的,但一个好的结构又可起到强化和扩充系统功能的作用。知识系统的功能是由知识管理的任务决定的。

知识系统的功能应该是:①高效率高效能地获取和组织知识;②能够有效地保存和保护知识;③能适时将知识传播到适当的地方给适当的人;④能高效率高效能地创造新知识,并用来开发新产品、新流程和新的经营管理方式;⑤能按市场规律经营管理知识资产;⑥能营造和加强有利于知识生成、转移、使用的组织文化。

上述各种功能有的与组织(企业、院所)原有的部门的职能相同或相似(如技术管理),有的则要扩充和深化(如人事管理要从职务、职称、工资、档案管理扩充到人才专长、能力的管理),有些则是新的职能。一个组织可能包含几个知识系统,而一个知识系统可能跨越几个组织,不像某些实物系统与具体组织关系那样明确。

宏观知识系统指的是一个国家、一个地区或一个行业的知识组织管理系统。以一个国家而言,科技是综合国力的基础,而创新是国家民族繁荣昌盛的不竭的源泉,因此建立国家创新体系是一项战略性任务。这不仅是科技界的任务,因为知识的生产、传播和应用是一个系统整体,是相互制约而又相互促进的,所以宏观知识管理涉及一个国家的科技、经济、教育、文化许多部门。

国家和社会将对不同的层次和不同的工作建立不同的投资、管理、评价与反馈体制与机制。这样形成的一个相互联系、密切结合的系统,正是未来知识经济中的知识系统主体。

这里还将涉及立法、行政、国际关系、社会生活等许多方面,由此构成的开放巨系统必须具有很强的适应性和自组织功能。

微观的知识管理可以用企业作为背景来加以考察,企业是社会经济系统的基本

组成单元,在未来的社会经济生活中,将愈来愈发挥它的作用,企业知识系统的使命在于组织与实施创新活动,使企业在竞争中立于不败之地。

对企业的知识管理来说,不仅与传统意义下的研究开发部门、科技信息(情报)部门以及技术管理部门有关,而且涉及到整个企业内部以及与外部关联的所有知识生产、传播与应用环节。

企业的知识系统对企业的创新活动有着关键性的作用。创新包括:①制度创新:这是企业创新的前提;②技术创新:这是企业创新的核心;③产品创新:这是企业创新的载体;④市场创新:这是企业创新的归宿;⑤管理创新:这是企业创新的保障。

怎样使这样一个知识系统发挥整体效应,必须对企业内部人与人之间的信息与知识沟通进行研究,明确某一位工作人员依赖谁提供信息与知识,他本人又生产出什么信息与知识,谁又依赖他的信息与知识。更重要的是如何使企业成员的隐性知识和创新能力能够充分发挥。这涉及到企业体制,运行机制等一系列问题。

当知识与经济融合之后,还有个经营的问题,广义的知识管理实际上就包含了知识的经营与管理两个方面。目前,企业界的有识之士已经认识到知识管理对创新的重要性,但对企业中的知识系统如何建立与管理还缺乏应有的自觉性。当然,即使在国外这也是一个新课题,需要加以研究。

三、知识系统的体系结构

由于知识系统的高度复杂性与抽象性,对于系统的研究常有无从下手的困难。为了构筑一个研究的基本框架,我们建议从研究知识系统的各种体系结构入手。

系统的体系结构(architecture)用来表述系统某一方面特点的结构方式和模块组成。它侧重原则、侧重方法而不具体规定技术与业务细节[5]。它不局限于讨论具体机构、工作流程和人员组合,而更着眼于为实现系统功能而做的原则性的安排。

我们所建议的知识系统的体系结构包括:组织体系结构、人员体系结构、技术体系结构、经营体系结构、文化体系结构等[6]。下面分别加以研究。

(一)组织体系结构

这涉及到知识的产生、传播、有效利用的组织原则与形式。知识管理可以具备两种形式。一种是经常性的管理,一种是按项目的管理。经常性管理的组织应该纳入现在已有的组织形式中,如研究开发部,设计处,技术监督部等。按项目管理是为了创新需要而组织专门的课题组、攻关组,项目结束时组织也就自然不存在。在知识工作中自然形成的实践社群(COP)应该是知识运作的主要形式,而像知识中心这样的专门知识管理部门应该及时组建。知识组织应该是学习型组织。

除了组织内部的部门机构之外，组织外部的机构有时也需要联合、协作，因为知识的运作涉及学科门类多，不是组织本身所能包揽下来的。现在提出的"虚拟组织"的概念在这里可以应用，这样形成的是一种网络型结构。它的生命周期决定于任务过程的长短。

（二）人员体系结构

这涉及到系统中的知识工作者以及相应的数据工作者。知识工作者包括设计师、工程师、建筑师、经济师、律师以及高层主管、领导人员等；数据工作者包括记录员、统计员、会计员等。由于知识在企业中作用的日益显著，因此国外有人建议在企业中设立知识主管(CKO)职位，在企业总管(CEO)的领导下专管知识工作。

在知识型企业中，企业家的作用像一个大型交响乐团的指挥，他无须去教每个演奏家如何演奏乐器(每个演奏家的专业技能都比指挥好)，而是如何使乐曲的进行更能协调，更能体会全曲精神。

作为一个知识群体，还有群体结构问题。这同时涉及组织和人员结构。群体结构包括学科结构、智力结构、年龄与阅历结构、思维结构等，要做到有较强的互补性，使得一个组织具有知识供给能力、知识应用能力、思维综合能力、情感意志调节能力等。

（三）技术体系结构

知识有两种载体：一种是生命载体——人；一种是物质载体，如书籍，期刊，磁性与光学媒体(磁盘、光盘)等。在知识获取、传播、使用与产生过程中，人与人之间、人与物质载体之间以及物质载体彼此之间是要进行知识交换的，技术体系结构指的是这个过程中使用的技术方法与工具体系。我们这里把所有与处理知识有关的方法与工具都归属于这个技术体系。如果再细分一下，又可以分成两个层次，一是狭义的工具层次，二是方法层次。前者主要指的是信息基础设施，包括硬件和相应的服务软件，后者主要是指如何在信息基础设施上收集、处理、利用知识的方法。

计算机的高速处理能力加快了人们获取和处理知识的速度和深度；大容量的存储和方便的检索使得人们很容易积累数量巨大、门类繁多、形式多样的知识；网络化消除了空间限，全球化的网络(目前的因特网与今后的第二个因特网)成为一个庞大的知识来源，虚拟现实技术使人们能像身临其境一样模仿一些难以具体实现的场景，提高了学习与实验的能力，凡此种种，都对人类的知识与智能的发展起到了促进作用。

在工作中，人们需要从获得的大量数据中提取信息与知识，而传统的数据分析方法，数据检索机制、统计分析等方法，只能获得数据的表层信息，不能获得其内在的、深层次的信息，换句话说，利用传统的数据分析方法，不能从大量的数据库数据

中获取知识。为使快速的数据产生、存储、搜索有相应的数据分析方法与其匹配，人们研究开发了一种新的自动信息处理技术——数据采掘和知识发现技术。

计算机辅助(CAD)系统，生产数据管理(PDM)系统，决策支持系统(DSS)和主管支持系统(ESS)等，可以把它们的工作和人的主动性、创造性结合起来，发挥作用。

在新的知识产生的过程中，为了进行个人与个人之间、个人与集体之间的沟通，一些计算机辅助协同工作(CSCW)的技术与工具和群件能发挥很好的作用。

（四）经营体系结构

知识经济像物质经济一样，有完整的再生产过程。它的生产、流通、交换、分配和使用的过程需要加以组织。

知识产品的生产就是知识的创新。知识产品也有价值和使用价值，也要分析它的成本与价格。

知识的分配就是知识的传播。学校教育，在职教育培训(包括网上教育)是主要的形式。当然也包含个人之间的传播。

知识产品的交换既有与物质产品相同的情况，又有不同的情况，如学术思想的交流就不存在等价交换原则。

知识产品的利用是一个复杂的过程。一般分成两个步骤：一是将基础研究成果转化为应用技术，二是将应用技术转化为生产力。科技的发展使科学技术逐渐接近，加速了转化过程。

上述过程都有如何经营管理的问题，需要建立一定的组织和运行规则。知识产品作为商品进入市场，它的交易与实物产品有些是相同的，有些则有它自己的特点，需要在实践中逐步形成和发展。

知识与经济融合后，使得知识作为一种无形资产，需要对它的经营方式方法进行研究。作为一种不同于有形资本的知识，它的投入与产出应该如何测度，其产权保护、分配与交换又遵循什么规律，都与传统的以物质生产为基础的经济学规律不同。建立它的经营运作体系，特别是激励与协作机制，是知识管理中的重要内容之一。

（五）文化体系结构

组织文化体系结构涉及组织内部全体人员的价值观、信念、是非善恶标准与工作习惯等，它一方面受地域、民族、历史等影响，另一方面也是人们长期在适应外界环境、整合内部组织过程中形成的，是组织内部人员在内外交往中，共同遵循的行为规范。通过对人这一能动主体的研究，更完满、更充分发挥人的主动性和创造性。先进的科学技术明明是会给组织带来很大效益的，但它的推行有时却遇到很大的阻

力或抵制，常常是一种先进的工作方式在某些组织中推行得很顺利，但在另一些企业中却不被接受。造成这些情况的原因都和组织的文化有关。所以在研究和建立知识系统时，不能不对组织的文化体系结构加以注意。

上面建议的知识系统的体系结构框架可能还不完善，还有待于在实践中检验和吸收新的思想来加以充实。

四、知识系统运作过程分析

知识系统中的过程可以分为知识运作过程和知识管理过程两类，这两类过程形成了一个两层结构。知识运作过程是在生产、研究开发或者营销一线的人员为了本身的工作需要而去收集知识或者生成新知识的过程。知识管理过程则是对知识的运作进行管理、提供有利于知识应用和知识创新环境的过程。两者既有区别，又是紧密联系着的。

知识的运作过程包含了知识从识别、采集到利用、创新的各种功能，具体说应包括：确定知识需求，进行知识识别，进行知识收集，进行知识选择，进行知识创新与知识集成，进行知识保存，进行知识传播与共享，利用知识，转化知识，销售知识（必要时）。

在知识经济时代，创新是企业生存与发展的关键因素。创新过程是一个知识转化与生成的过程。组织的创新是由企业内外许多个人的知识相互作用、转化而实现的。

在管理科学界，长期以来，有一种把组织看作是一个信息处理机器的观点。按照这种观点，一个组织的工作就是处理从外界获得的信息，进行决策，产生行动。但是这种观点无法对创新进行满意的解释。因为创新不仅处理了信息，而且产生了新知识，通过与环境的互动，还改造了环境。

组织知识的产生和组织的学习是分不开的。过去对学习的研究常采用黑箱的方法，从刺激与反应关系入手，缺少对内在机制的探讨。现在可以把学习与知识生成联系起来，从动态观点研究知识生成过程。

个人知识的创新过程，涉及到认知心理学等学科。从系统的观点来看，个人的知识生产过程是在一定的需求或启发下，树立一定的目标，通过学习、调查、实验、实践，输入基础知识、专业知识以及相关的信息与知识，通过思维加工，构成一定的知识结构。再经过实践和创造性思维，进行知识重组，从而产生新的知识。这里面有一个反馈控制过程，在每次知识重组、产生新知识时，都要与目标相比较，根据差距调整知识结构，继续思考和实践，直到达到目标为止。当然，在此过程中也会发生调整目标的事，或是调整整个过程的事，就像在一个自适应系统中的过程那样。

新的知识的产生（创新）要经过准备、孕育、顿悟、检验等阶段，人的思维过程包

括抽象、概括、分析、综合、判断、推理等逻辑思维环节,但仅仅依靠逻辑思维是无法完成创新过程的。钱学森教授在创建思维科学的过程中曾经讲过:“科技工作决不能局限于抽象思维的归纳推理法,即所谓‘科学方法’,而必须兼用形象或直感思维,甚至要借助于灵感或顿悟思维。”联系到所涉及到的知识,逻辑思维多半应用了可以通过语言文字传递和交流的显性知识,而形象思维还应用了只可意会而不可言传的隐性知识。近年来国内外管理学界开始重视隐性知识的研究,而早在两千多年前,我国解释《易经》的《易传》中就说到过“书不尽言,言不尽意”,我国传统哲学在这方面有丰富的遗产,有待我们去挖掘,吸收和运用。

人的智慧,实际上就是人认识客观事物并运用知识解决问题、进行创新的能力,它本身就构成了一个系统,而且是能够学习和进化的系统。

完整的创新过程不仅涉及个人的活动,还涉及整个团队、组织的活动;不仅涉及个人的知识的应用和创新,还涉及组织的知识的应用和创新。组织也具有自己的知识(包括显性与隐性知识),表现为企业所掌握的技术、专利、生产和管理规程,有的已嵌入了产品与服务之中。组织知识是将个人产生的知识与其他人交流而形成并结晶于组织的知识网络之中的。个人只能获得与产生专门领域的知识,而在创新活动中,需要综合各种知识,转化为生产力,这就需要组织知识。

组织在环境中生存也会积累经验,增长经历,从而生成组织的隐性知识。它不是短时间就能够形成的,由于它在创新中的独特作用,它是组织的无形的宝贵财富,是组织的核心竞争力。

对于组织知识的产生与知识创新,日本管理学者野中(I. Nonaka)等提出的知识转化与生成模型[7]是很有启发意义的。这一模型包括三个主要组成部分:一是知识通过社会化、外化、组合与内化的生成过程,二是知识生成的平台,他们把它称为“Ba”,三是知识资产。其中隐性知识显性知识的相互转化以及个人知识和组织知识的相互转化与生成的概念,在当前知识管理研究中是很有影响的,但也受到一些质疑。如有的学者(例如美国的 S. Cook,见参考文献[8])认为意会性知识是不能转化的,而新知识或者说新的知晓是通过个人显性、个人隐性、组织显性与组织隐性四类知识以一种“生成之舞蹈”方式轮番作用而产生的,四类知识各有各的用途。

上述两种模型各执一词,应该说,各自都有其适用的情况。本文作者认为,隐性知识有一部分是可以转化的,因为沿着人类历史的长河来看,现有显性知识绝大部分是由隐性知识(人的经验、技巧)转化而来的。但是确实有一部分是不能转化的,像人的感悟、洞察力等,正是这不能转化的部分,用来作为完成上面那一部分转化的工具。

上面两类模型对两类知识的看法是基于非此即彼的二分法(dichotomy)的。但根据我们的看法,实际生活中无论是个人还是组织的知识,都是以一种连续的谱系存在的。像野中那样在二分法指导下的意见认为知识的创造是从意会性知识转化

为言传性知识，应该是指某些宏观的结果和关键性知识而言的，但实际上在创新过程中，在不同显性度的连续谱系的各层次上，既有把还不够明晰的知识通过像专家系统、数据或文本挖掘变得更加明晰与易于言传，也有从不太能够说出来变得能够说出一些，还有从完全缺乏经验积累变得能够形成一些积累，一句话，都是在不同程度上提高知识的明晰性和可言传性。所有这些知识需要加以集成，形成一定的知识结构，才能为新的想法的涌现准备条件。这种涌现实际上是在一定的知识结构基础上产生的突变。这里存在相互融合(fusion)的过程。从系统理论的角度看来，这个系统是个自组织系统，特别是共识的达成与新概念的产生，符合自组织的一些原理，可以从自组织系统角度对它进行深入分析。

当前举国上下都在关注培养自主创新能力的问题。在创新的不同阶段中，都有知识运作的过程，其中新知识的生成是关键环节。根据目前的提法，自主创新有下列三种形式：原始创新；集成创新；引进吸收消化再创新。

从系统工程的角度来看，后两种都可以算作是系统集成创新，即使是原始创新，对一些大型设备、流程或经营管理模式来说，也多少带有系统集成特点。所谓系统集成创新，是把已有的新知识、新技术、新部件创造性地集成起来，以系统集成的方式创造出新产品、新工艺、新的生产方式或新的服务方式、新的管理模式。它同样是一种创新，它的“新”表现在整体上，系统上。

系统集成创新涉及到多种技术与学科，它的实现与产生实际效果需要来自不同领域的许多人参加，不但要用到个人知识，还需要集体(组织)的知识。这里综合集成的思想和方法将起到重要的作用。

在思维方面，正如钱学森教授所说的“要研究个人跟集体和集体创造的精神财富在思维方面的相互作用”[2]。

日本的野中等提出的“Ba”的概念是指一种创新的环境，钱学森教授提出的综合集成研讨厅的概念就是一种决策和创新的环境。野中更多的是从知识转化着眼的，而研讨厅则是从思维方式着眼的，具有更大的动态性和主动性。对知识的研究不能脱离思维，这是钱学森教授给我们的启示。

在新知识生成的过程中，直觉起到了先导性的作用。直觉是人的大脑仅凭感觉、或者凭少量感性信息(个别、特殊)的启示，就对事物的本来面貌、本质、相互联系、相互关系、变化规律(一般、普遍)直接做出判断的认识活动。正如钱学森教授所说的“工程师处理问题，别人看来不明白是怎么回事。譬如总工程师最后下了决心，大家就这么干。一干对了，究竟是怎样对的？为什么要这样干？谁也不知道是怎么回事”。“战争中的指挥员，都是这样的人物。他有丰富的经验，他把地形一看，形势一估计，决心就下了。参谋们可能向他提了许多方案、建议，他说不行，就这么打。别人搞不清是怎么回事，但是仗一打，胜了，说明他是正确的”[2]。这都是直觉在起作用。

在系统研究过程中，本文作者认为有一种可以称为“系统直觉”的思想活动起到了先导的作用[9]。系统直觉是能够把复杂问题看作是系统问题的一种直观感觉，这种感觉是由于过去处理复杂问题或系统问题积累的经验和一定的系统知识累积而成的。我们经常听到领导人或者掌握全局的人在面临一个复杂的任务时，说到这是一项系统工程，这正是他们根据系统直觉得出的结论。在我们这样的大国中，面临众多复杂问题，涉及多种相互关联的因素，领导人或者掌握全局的人经历过许多难以解决的事件后，自然会产生这样的直觉。能够有这样的感觉确实是难能可贵的，有时凭系统直觉也解决了问题，但在非常复杂的情况下，不能停留在直觉水平上，应该进一步进行系统分析，再通过系统综合来解决问题。

系统直觉有下面这些特征：1. 有系统整体性的感觉；2. 对整体与部分的关系上有一定的认识；3. 是在“自上而下”地看问题；4. 有很强的情景依赖性；5. 运用了不可言传的意会性知识。

除了个人的直觉以外，对一个团队也有集体的（组织的）直觉，著名的心理学家荣格（C. G. Jung）就指出过这一点。钱学森教授在创建思维科学时多次提到了集体思维，其中应该包括集体直觉。荣格曾经讲过集体直觉有遗传因素，但大部分还是在集体生活和工作实践中形成的。这涉及到集体的隐性知识的形成，也就是“同感”的形成。系统直觉在系统集成创新过程中起到了先导作用。他为一个集体形成共识提供了先决条件。

钱学森教授还提醒我们从我国的传统哲学中汲取有用的思想。他曾提出应该研究已故的哲学家熊十力所提出的“性智”与“量智”概念。从知识侧面来看，量智涉及显性知识的获取、探究和运用，性智则涉及隐性知识的获取、探究与运用，两者相结合才成为知识创新的基础。我们经过学习还了解到，熊十力提出过“感识”、“意识”、“察识”的概念[10,11]。感识相当于感性认识，意识相当于理性认识，属于工具理性，而察识则已经融入了价值观，属于价值理性了。现在我们提出要树立科学发展观和构建社会主义和谐社会，正是要把人们的认识水平提高到察识的水平和境界。察识的形成涉及到显性知识与隐性知识的集成与融合。如何能达到这样的水平和境界去进行创新，需要深入学习研究这些哲学遗产，吸取有用的部分，与当代科学技术相结合，来丰富有关知识和创新的理念和方法。

五、结　语

为了迎接知识经济的到来，对于知识管理与创新的研究是当前管理学科的重点之一。我们在钱学森系统科学与思维科学的指引下，通过建立知识系统工程学科来研究和实现知识的有效应用和创新，希望通过学科的交叉与融合推动知识学科的建立和应用。几年来我们按照这一思路建立了学科的构架，研究了有关的理念、方法

和工具，开发了一批知识管理系统。但为了迎接未来的挑战，还有大量工作要做，这方面的工作确实是任重而道远的。

在运用钱学森的系统科学与思维科学思想的过程中，深刻领会到他的科学技术与哲学思想的博大精深。今后我们更要通过具体工作深入学习和实践，在实现中华民族伟大复兴的科学技术研究道路上不断地前进。

我们的研究工作先后曾得到国家自然科学基金两个重点项目的资助(编号：79630010;70431001)。

参考文献

[1] 涂元季:《人民科学家钱学森》,上海,上海交通大学出版社,2002年

[2] 钱学森主编:《关于思维科学》,上海,上海人民出版社,1986年

[3] 王众托:知识经济,知识管理与信息化,《98大连—香港国际计算机会议论文集》,1998,大连,大连理工大学出版社

[4] Wang Z. T. Knowledge Systems Engineering: A New Discipline of Knowledge Management, Proceedings International Symposium on Knowledge and Systems Sciences: Challenge to Complexity, Ishikawa, Japan : Japan Advanced Institute of Science and Technology Press, 2000

[5] 王众托:知识系统工程,载于许国志等主编:《系统科学与工程研究》,上海,上海科技教育出版社,2000年

[6] 王众托:《知识系统工程》,北京,科学出版社,2003年

[7] Nonaka I., Teece D. (Eds), Managing Industrial Knowledge, London, England: Sage Publication Ltd, 2001

[8] Cook S., Brown J., Bridging epistemologies: The generative dance between organizational knowledge and organizational knowing. Organizational Science, 10(4), 1999.

[9] Wang Z. T. Systems Intuition: Oriental Systems Thinking Style, *Journal of Systems Science and Systems Engineering* 12:129—137 June 2003

[10] 景海峰编:《熊十力选集》,长春,吉林人民出版社,2005年

[11] 丁为祥:《熊十力学术思想评传》,北京,北京图书馆出版社,1999年

钱学森与人-机-环境系统工程

龙升照

中国航天医学工程研究所，北京，100094

1981 年，在著名科学家钱学森院士的亲自指导下，一门综合性边缘技术科学——人-机-环境系统工程(Man-Machine-Environment System Engineering，简称为 MMESE)在我国诞生。钱老对这门新兴科学给予了极高评价。他于 1993 年 10 月 22 日指出："你们是在社会主义中国开创了这门重要现代科学技术。"[1]

人-机-环境系统工程是运用系统科学理论和系统工程方法，正确处理人、机、环境三大要素的关系，深入研究人-机-环境系统最优组合的一门科学，其研究对象为人-机-环境系统。系统中的"人"，是指作为工作主体的人(如操作人员或决策人员)；"机"是指人所控制的一切对象(如飞船、汽车、飞机、生产过程……)的总称；"环境"，是指人、机共处的特定工作条件(如温度、噪声、振动……)。系统最优组合的基本目标是"安全、高效、经济"。所谓"安全"，是指不出现人体的生理危害或伤害，并避免各种事故的发生；所谓"高效"，是指全系统具有最好的工作性能或最高的工作效率；所谓"经济"，就是在满足系统技术要求的前提下，系统的建立要投资最省。

人-机-环境系统工程的研究内容主要包括 7 个方面(见图 1)：1. 人的特性的研究；2. 机器特性的研究；3. 环境特性的研究；4. 人-机关系的研究；5. 人-环关系的研究；6. 机-环关系的研究；7. 人-机-环境系统总体性能的研究。

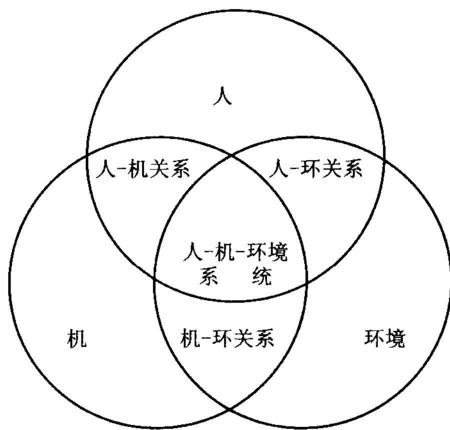


图 1　人-机-环境系统工程研究范畴示意图

本文以钱老的一系列重要讲话和信函为根据，从指导人-机-环境系统工程的及时创立、强调人-机-环境系统工程的重要作用、促进人-机-环境系统工程的蓬勃发展、明确人-机-环境系统工程的应用领域和展望人-机-环境系统工程的光辉前景等五个方面，全面阐述了钱老精心指导人-机-环境系统工程的创立及发展的全部历程。

一、指导人-机-环境系统工程的及时创立

1979年11月30日，钱老在上海理工大学系统科学与系统工程研究所成立大会上的讲话中指出："在系统工程的实践当中，它总离不开人的因素。可以概念地说，我把人也包括在系统里面了，但是具体你怎么办？人太复杂了，现在还没有一个通用的理论可以预计人的行为。"[2]

根据钱老提出的应该"把人也包括在系统里面"的指导思想，航天医学工程研究所的陈信、龙升照，通过深入学习钱老关于系统科学和系统工程的科学思想，并在钱老的亲自指导下，全面总结我国载人航天预先研究的实践经验，同时也对国内外相关领域的研究现状进行了认真分析，于1981年撰写了《人-机-环境系统工程概论》一文[3]，概括提出了人-机-环境系统工程的科学概念，用系统科学的思想和系统工程的方法，将人、机、环境三大因素包含在同一个系统之中，并提出了实现三大因素最优组合的途径。这不仅标志着人-机-环境系统工程这门新兴科学的形成，而且也实现了钱老提出的应该"有一个通用的理论可以预计人的行为"的设想[4].

1985年10月21日，钱老在航天医学工程研究所的讲话中非常高兴地说："人-机-环境系统工程，这是一项很重要的工作，因为过去我们对精神与物质，主观与客观，人与武器，这些问题只能从哲学的角度论述，要具体化好像就没有办法，不能定量，也不能严格地科学地分析，虽然从哲学的角度说，那些话都是对的，但是要具体地用，比如，用到国防科学技术方面，那就不是一个科学问题了，用科学的方法，计算的方法，分析的方法不能解决这个问题。但是，这么一个状态到最近10年我看开始有了变化，主要是由于自然科学技术的发展，对于人，在人的生理、功能、心理以至于脑科学方面的发展。然而在这些发展的同时还有另一方面的发展——就是系统科学的发展，它可能把这各个领域里的发展综合起来，由量变到质变，产生一个飞跃。你们所(指航天医学工程研究所)提出来的人-机-环境系统工程，把人、机器跟整个客观环境连在一起来考虑，这就跟单个考虑人、考虑环境不一样，这就是辩证法，综合了，辩证统一了。因此，你们所提出这个问题——人-机-环境系统工程——对于国防科学技术是有深远意义的。"[5]

二、强调人-机-环境系统工程的重要作用

1985年10月28日，钱老在航天医学工程研究所的讲话中指出："接前两次讲过的，我在这儿一直宣传，就是同志们的工作对今后科学的发展以至国家建设都具有重要的意义……作为应用研究所，你们的人-机-环境系统工程的发展，肯定是一次技术革命，不管我们是否认识到这个高度……人-机-环境系统工程研究确实非常

重要。”[6]

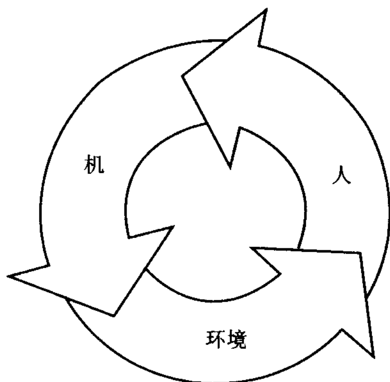


图 2　人、机、环境相互作用示意图

钱老所强调的人-机-环境系统工程研究确实非常重要，主要包含 3 个方面的内涵：[7~10]

第一，人-机-环境系统工程为人类社会的健康和可持续发展提供了科学方法。应该说，人类社会发展的历史，就是一部人、机（包括工具、机器和计算机）、环境三大要素相互关联、相互制约、相互促进的历史，其情况如图 2 所示。由于环境的影响，高级灵长目动物演变成为人类；人类的诞生导致了机的出现；机的出现又产生了新的环境；新的环境又在影响人类的生活、工作和生存。

时至今日，当人们沉浸在享受高科技带来的社会繁荣之际，却也不知不觉地闯入了两大误区：1. 在机器设计时，由于漠视了人的特点和要求，致使工作系统效率降低、事故增加，对社会发展造成严重影响；2. 在机器设计时，由于漠视了环境的特点和要求，不但影响了机器本身性能的发挥，而且带来了严重的环境恶化，对人类的生活、工作和生存造成重大威胁。今以汽车为例，它的出现，一方面是极大地推动了社会的进步，另一方面却也给社会带来了灾难，每年死于道路交通事故的人数全世界约有 25 万人，同时，它也是造成城市污染的主要因素之一。其他的类似例子也很多。因此，当务之急，就是要研究和探索一套研究人、机、环境三大要素的运行规律及其最优组合的科学方法。

人-机-环境系统工程的诞生，使人们在设计和研制任何一个人-机-环境系统时，将产生三个方面的飞跃：1. 从经验走向科学；2. 从不自觉走向自觉；3. 从定性走向定量。其结果，不仅可以避免经济上的巨大损失，而且可以加速人类社会发展的进程。

第二，人-机-环境系统工程为社会生产力的发展提供了技术手段。

通常，哲学上是将生产力定义为：“从事物质资料生产的人同以生产工具为主的被用于生产的劳动资料相结合，就构成社会生产力。”很显然，生产力应该是人（从事物质资料生产的人）、机（生产工具和机器）、环境（生产场所的有关劳动条件）三大要素的有机结合（见图 3）。因此，采用人-机-环境系统工程方法，就能全面优化人、机、环境三者之间的关系，推动社会生产力的全面发展。

第三，人-机-环境系统工程也为国防现代化建设和部队战斗力的提高提供了切实有效的技术途径。

众所周知，在任何战争中，武器装备是进行战争的物质基础，是决定战争胜负的

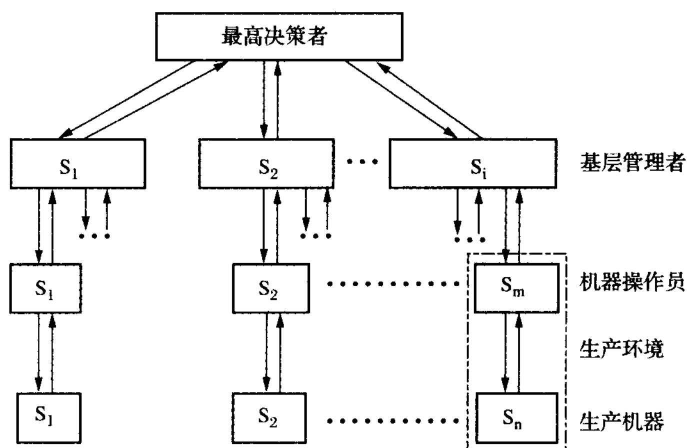


图 3　社会生产力与人、机、环境的关系

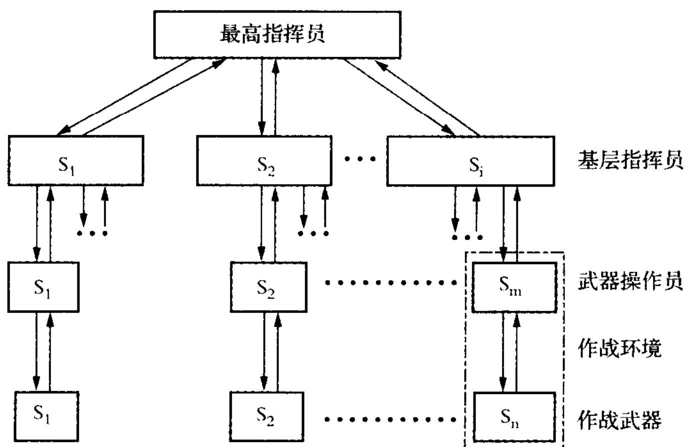


图 4　部队战斗力与人、机、环境的关系

基本条件。但是,任何武器装备必须靠人去掌握和操纵,而且它也能在特定的作战环境条件下才能发挥其性能。因此,武器装备只是一种可能的战斗力,它只有同人和环境有机结合,才能成为现实的战斗力。所以,正确处理人、武器装备、作战环境三个基本要素的关系,历来都是提高部队战斗力的关键(见图 4)。只要我们在军事领域积极应用人-机-环境系统工程理论,就能为国防科学技术的发展和部队战斗力的提高产生积极作用。

三、促进人-机-环境系统工程的蓬勃发展

1985年10月21日，钱老在航天医学工程研究所的讲话中指出："国防科工委（现总装备部）指示科技委下个月下旬要开一个会，国防科技的发展战略讨论会。我觉得你们所在那个讨论会上应该有一个报告，讲为什么我们在中国要发展人-机-环境系统工程，它对我们国家国防技术发展的意义。

"科技委的会11月20日召开，你们研究所的报告无论如何要在11月中旬准备好、印好。我今天讲一讲这么一项任务，确实很重要，对于我们中国的国防科学技术的发展战略是很重要的问题，请大家努力吧。"[5]

按照钱老的这一指示，其后由龙升照主笔撰写了题为《加强人-机-环境系统工程研究，促进武器装备研制的发展》的报告[11]，并由陈信同志在战略讨论会上进行了宣读。其后，又由龙升照同志对《武器装备人-机-环境系统工程研究》进行了项目论证。1986年5月，总装备部将"武器装备人-机-环境系统工程研究"列为国防科技应用、基础研究重点项目；1987年4月，总装备部成立了人-机-环境系统工程专业组；1993年10月，中国系统工程学会人-机-环境系统工程专业委员会成立，而且从1993年起，每2年都要召开一次全国人-机-环境系统工程学术会议，至今已召开了七届；而且还分别从每次学术会议中精选出一批比较优秀的论文，分别编辑出版《人-机-环境系统工程研究进展》，在全国公开出版发行，目前已出版了七卷。所有这些，都标志着人-机-环境系统工程研究在我国已有了蓬勃的发展。这一切，都与钱老的关心和指导密不可分。

四、明确人-机-环境系统工程的应用领域

1993年10月22日，钱老在给龙升照的信中指出："我收到您主编的《人-机-环境系统工程研究进展(第一卷)》，翻看了之后，感到非常高兴，1985年秋提出的一个想法(这里是指钱老1985年10月21日在航天医学工程研究所的讲话)，现在8年之后已赫然成书，500多页的巨卷！而且研究范围已大大超出原来航天，内容涉及航空、航天、兵器、电子、能源、交通，电力、煤炭、冶金、体育、康复、管理等领域！你们是在社会主义中国开创了这门重要现代科学技术。"[1]钱老这段饱含深情的话语，为人-机-环境系统工程的应用领域描绘了一幅光辉无比的宏伟蓝图。

人-机-环境系统工程认为，凡是有人参与的工作系统，都可以定义为一个人-机-环境系统。而且，根据各种系统的性能特点及复杂程度，又可将人-机-环境系统分为三种类型：简单(或单人、单机)人-机-环境系统、复杂(或多人、多机)人-机-环境系统和广义(或大规模)人-机-环境系统。因此，人-机-环境系统工程虽然是一门新兴的

边缘技术科学，但它的踪迹却已深入到国民经济的各条战线。根据钱老上面指出的应用领域，表1列出了它们的人-机-环境系统特点。在各个领域的实际应用中，应根据具体应用对象的各自特点，明确界定人-机-环境系统的具体功能与内涵，以便取得最佳应用效果[4]。

表1　人-机-环境系统工程的应用领域

应用领域	应用对象	人-机-环境系统三大要素		
		人	机	环境
国防建设	航天	航天员	航天飞行器及设备	超重、失重、冲击、孤独……
	航空	飞行员	航空飞行器及装备	超重、冲击、高温、缺氧……
	航海	船(艇)员	舰船、潜艇及装备	有害气体、振动、噪声、水下高压……
	兵器	装甲兵	装甲车辆及装备	高温、高湿、振动、噪声、有害气体……
	作战指挥	指挥员	作战部队	作战环境(地形、地物、气候……)
	……	……	……	……
交通运输	飞机	飞行员	民航飞机	高温、缺氧、噪声……
	汽车	驾驶员	汽车	车内环境、车外路况及气候……
	火车	驾驶员	火车	车内环境、车外路况及气候……
	船舶	驾驶员	轮船	船内噪声、温湿度，船外水域状况……
	……	……	……	……
工业生产	煤炭	煤炭工人	掘煤设备	振动、噪声、粉尘、高温、高湿……
	钢铁	炼钢工人	炼钢设备	高温、噪声……
	生产管理	各级管理者	生产群体	生产内外环境(物理环境、营销环境……)
	……	……	……	……
……	……	……	……	……

五、展望人-机-环境系统工程的光辉前景

1986年2月28日，钱老在航天医学工程研究所的讲话中指出："我们中国人也别老看不起自己，可以说我们在人-机-环境系统工程以及航天医学这些方面的学术观点、学术思想当前在世界上是领先的，不是落后的！"[5]

钱老为什么认为人-机-环境系统工程的学术思想在世界上是领先的？为了回答这个问题，我们不妨先对国外相关领域的研究概况作简要叙述[12]。

第二次世界大战期间，各种新式武器不断出现，性能也日趋复杂，人与机器的矛

盾也日益尖锐。为了充分发挥人的作用，国外先后产生了一些研究人和机器相互关系的学科。美国有人的因素(Human Factors)、人体工程学(Human Engineering)、人的因素工程(Human Factor Engineering)、人-机系统(Man-Machine System)等众多的学科名称，西欧有工效学(Ergonomics)之称，东欧有工程心理学(Engineering Psychology)之称。这些学科对于推动科学技术的发展起到了非常重要的作用。但是，由于它们的研究重点是让人如何适应机器、适应环境，而对于机器的设计如何适应人的特点和需要，以及如何改造和控制环境等问题虽然有所认识，但是缺乏用系统的整体思路来全面解决人、机、环境的相互关系问题。虽然有了关于人、机、环境的各种数据，但如何运用这些数据，仍然是凭经验进行，因而难以取得最佳效果。1980 年末，美国科学院应陆、海、空三军的要求，组成一个专门委员会，着重分析和研究该领域的研究现状，并于 1983 年 1 月提出了题为《人的因素研究需求》的专门报告[13]。该报告承认，20 世纪 70 年代由于单纯依靠过去 20 年的数据而放松了基础研究，因而导致若干设计和研制的重大失误。于是，对科研部署作了一些调整，但仍未摆脱传统框框的束缚。直至 1996 年，美国国防部在它的《国防技术计划》中还无可奈何地指出[14]，“几年来，已采集了大量的有关人体机能的数据，但是，这些数据既不能为设计集成界所利用，也很难找到并加以解释。结果，‘(系统)集成’总是要在设计过程后期完成，且其鉴定要依赖于昂贵的实物样机”。另外，美国的 IEEE 杂志也对美国的这种研究现状提供了一个很好的例证。20 世纪 50 年代，该杂志有一种汇刊名为 IEEE Transactions on Human Factors in Electronics(电子学中人的因素)；60 年代，该汇刊改名为 IEEE Transactions on Man-Machine System(人-机系统)；70 年代，该汇刊又与另一汇刊 IEEE Transactions on System Science & Cybernetics(系统科学与控制论)合并，改名为 IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics(系统、人与控制论)。该名称一直沿用至今，并又将它分为 3 个部分(分卷)出版：Part A, System and Human(系统与人)；Part B, Cybernetics(控制论)；Part C, Applications and Reviews(应用与述评)。由此可见，虽然他们想从系统的高度来考虑问题，但又苦于没有办法。因此，他们对于如何来阐述这个十分复杂的研究领域，也显得十分茫然。

人-机-环境系统工程正是针对以上现实而提出。它的诞生虽然与人的因素、人的因素工程、工效学、人-机系统等相关学科有关，并从这些学科中汲取了丰富的营养，但它高于这些相关学科。它不但包括的内容更广泛(尤其是环境因素的考虑)，而且更是特别强调从系统总体的更高层次来处理问题。

因此，2001 年 6 月 26 日，钱老在给龙升照的信中又指出：“20 年来，你们在人-机-环境系统工程这一新兴科学领域进行了积极的开拓和探索，并取得了非常可喜的成绩，我感到由衷的高兴。

希望你们今后再接再励，大力推动人-机-环境系统工程理论及应用的蓬勃发展，

为中国乃至世界科学技术的进步作出积极贡献！”[6]

六、结 论

毛泽东同志早就强调指出“我们中华民族有自立于世界民族之林的能力”。可以深信，只要不断以钱老有关人-机-环境系统工程的重要学术思想为指导，我们就不仅能够逐步完善人-机-环境系统工程的理论体系及研究方法，而且可以极大地推动人-机-环境系统工程的广泛应用。这不仅对中国，乃至对世界科学技术的进步，必将作出积极贡献！

参 考 文 献

[1] 钱学森院士致龙升照同志的函，龙升照主编：《人-机-环境系统工程研究进展（第二卷）》，北京科学技术出版社，1995：扉页

[2] 钱学森院士在上海理工大学系统科学与系统工程研究所成立大会上的讲话，《中国科学院系统科学研究所-上海理工大学上海系统科学研究院成立暨上海理工大学系统科学与系统工程研究所建所25周年文集》，2005年

[3] 陈信，龙升照：人-机-环境系统工程概论，1981年《自然杂志》，1985，8(1)

[4] 龙升照，黄端生等著：《人-机-环境系统工程理论及应用基础》，科学出版社，2004年

[5] 钱学森同志关于人-机-环境系统工程的重要论述，龙升照主编：《人-机-环境系统工程研究进展（第五卷）》，海洋出版社，2001年

[6] 钱学森院士致龙升照同志的函，龙升照主编：《人-机-环境系统工程研究进展（第六卷）》，海洋出版社，2003

[7] 侯静，钱学森关注“人机关系”——访人-机-环境系统工程专家龙升照，《科技日报》，2001-12-14

[8] 龙升照：《人-机-环境系统工程理论及其在生产力发展中的意义》龙升照主编：《人-机-环境系统工程研究进展（第一卷）》，1993年

[9] 龙升照：人-机-环境系统工程理论在科学技术发展中的地位及应用前景分析，龙升照主编：《人-机-环境系统工程研究进展（第四卷）》，1999年

[10] 龙升照：人-机-环境系统工程的过去、现在与未来——纪念人-机-环境系统工程创立20周年. 龙升照主编：《人-机-环境系统工程研究进展（第五卷）》，2001年

[11] 陈信，龙升照，杜文侠：指导者钱学森，《国防科学技术发展战略讨论会会议资料》，1985年

[12] 龙升照：人-机-环境系统工程与一些相关学科的关系，龙升照主编：《人-机-环境系统工程研究进展（第六卷）》，2003年

[13] Research needs for human factors. U. S. National Academy Press, Washington, D. C. , 1983

[14] 美国国防部国防技术计划，中国国防科技信息中心，1996年

沙产业与系统科学

刘　恕
中国科学技术协会，北京，100863

“20世纪70年代末以来，在20多年的时间里，他在社会科学、系统科学、思维科学、人体科学、科学技术体系以及马克思主义哲学等领域，进行了不懈的探索，提出了许多新观点、新思想、新理论，为我国科学技术的发展做出了新贡献。这些成就作为他整个科学成就的‘另一部分’与他在‘两弹一星’方面的成就相比，毫不逊色，更显辉煌。”这是上海交通大学在《钱学森论系统科学》一书“导读”中对钱老科学成就作的简要评价。这些评述，令人感到十分贴切和准确，完全道出了我们这一代人的心里话。我作为一个从事沙漠研究的科学工作者，理解钱老运用系统科学的观点和方法所阐述的远见卓识，所做出的科学判断和预见，一是通过结合专业难题的思考和探索，二是有幸因工作原因有机会得到钱老耳提面命，讲授关于地理科学，关于第六次产业革命的理论。一步步积累着体会，一次次地感悟、理解，并在实践活动的效果中，获得更深的启迪和更加坚定了不断学习的信念。

一、结合对问题思考，理解系统科学是认识客观世界、破解疑难问题的“智慧的钥匙”

1986年，我长期工作过的宁夏中卫中国科学院沙坡头沙漠科学研究站建站三十周年。30年间，包兰铁路沙坡头地段开展了大量的铁路防沙的研究试验工作，提出的沙坡头铁路防沙工程体系作为一项有功效的技术措施，在腾格里流动沙漠之中，历经三十年的考验，稳定、可靠地保障铁路不被流沙掩埋。但当时防护体系的主要部分植物固沙带出现了人工固沙植物枯萎衰退现象。面对现实，如何认识，怎样把握今后的研究方向，引起大家的思考。就此问题我们尝试以系统论和系统分析方法去认识沙漠铁路防沙工程体系，在系统科学创意性的指导下，把思想方法运用到实践经验的研究总结中去，启发了思考。我在《沙坡头铁路防沙工程的系统特征》一文中(1986年4月)，分析了沙坡头铁路防沙工程体系的结构性特征、整体性功能特征、演化特征后提出：

(1) 沙坡头铁路防沙工程体系是由阻、固、输三个单项防护措施组成相互关联、相互影响、相互作用，完成保护铁路不被流沙掩埋的功能工程整体。只有各种单项

防沙措施有机组合成为工程体系时,才能发挥整体的功能效益。此种整体的防护效益大于各单项效益的总和。

(2) 建立任何一种防治自然灾害的人工系统,都应首先确立明确的功能目标,并深刻地理解结构与功能的辩证关系,只有不断地调适体系结构,才能使预期功能目标得以实现。

(3) 系统与环境间是不断进行交换的,由于沙坡头铁路防沙工程体系防护效益引起的环境变化,产生了系统中人工植被反馈作用导致的自我调整。沙坡头铁路防沙工程体系中正在经历着一个由原本单纯的人工植被系统向人工植被系统和天然地带性植被系统自然融合的过渡。这种过渡,从系统观认识是系统结构的变化,是朝向加强防护体系的防护性能,提高了它的稳定性方向的变化。由于外部环境的众多的要素都在经历着极大的变化(沙地水分的变劣;天然种的侵入;大气沉降物的积累和沙地结皮的形成),因而预卜变化后的发展趋势和系统最佳的优化结构方案的选择,应是摆在科研工作面前刻不容缓的新任务和新课题[1]。

20 世纪 80 年代后,尝试着学习用新的系统分析方法,加深了对试验研究客体的认识并把认识条理化、系统化。不仅注意功能目标的实现和将来的演化趋势,还注意了功能系统的总体观念,即单项措施服务于目标要求;整体观念,即各类措施协调一致、统一于整体;动态长程观念,把握体系在时空间的变化。回忆 1986 年尝试学习的心得,像是进入了一个思维活动的新门槛。

缺少淡水,是干旱、半干旱地区制约发展的首要难题。我国西北及内蒙地区的干旱半干旱地区分布有:塔里木水系的阿克苏河、叶尔羌河、喀拉喀什河和玉龙喀什河的和田河;开都河、玛纳斯河;黑河、石羊河、疏勒河;格尔木河等,构成了若干个内陆河流域。由于这些大河的河道长达数百公里,往往跨越行政管辖的边界。在大家都谋求快速发展的时候,扩大水浇地、兴办工业中,因上游的"得"会引起下游的"失";中、上游水浇地的扩大带来的是下游天然草场的衰败和丧失;人工排灌溉系统的扩大会导致天然水网的退缩和湖泊的水位下降以致干涸。总之,积极的经济开发活动,往往造就"兴乐园"引发"失乐园"的悲剧,正像外国故事里描述的那样,在新兴乐园中能听到新近的荒废乐园的哭泣声。随着我国干旱、半干旱地区,由于人口增多和社会发展,人对水的需求量增加速度要高出人口增长速度 3 倍;而且会因经济加速发展、特别是开发领域向工业和第三产业扩展,对水资源的需求将会加大并伴有内陆河水质被污染问题出现,上、中、下游之间诸多矛盾将愈来愈突出。对于这种流淌着的天然资源,管理部门和使用单位之间,存在着编制发展规划、决定用水规模、厉行节水制度、收缴水费等等一系列需要协调和统筹的问题。内陆河水,不仅用于灌溉、发展水产业,是人们生活和工业生产的资料,更是干旱地区维系一切生命的源泉。生活在缺水的自然条件中,人们总是往往把希望寄托在"风调雨顺"上,或者渴求跨流域"调水"。前者赖依自然的恩赐,后者相信依靠资金和技术进步可以为大

自然“动外科手术”,“令高山低头,让河水让路”。但近百年的实践告诉人们,干旱半干旱地区走出缺水困境的根本出路在于水资源的科学管理。

正是基于以上这种认识,我在1997年提出:“内陆河流水资源合理利用,属于从整体出发的宏观抉择,管理层次上权限愈下放,愈难找到比较妥善的解决办法,因此各大内陆河流应有独立的、超出行政区域管辖的权威机构,赋予其统筹管理及监督执法的权力。”[2]

再如,甘肃武威石羊河流域综合治理工作同样是一个复杂的系统工程。石羊河流域下游民勤绿洲的衰退已经成为众所周知的热门话题。面对难题,只能利用系统科学的科学方法来对待。首先要充分研究认识石羊河流域的自然特征,石羊河流域地下水和地表水是一个互相转化的统一体。二要把石羊河流域综合治理工作当成一个社会难题,原因是石羊河虽是一条典型的内陆河,但石羊河不只是一条自然河,人们沿河生息已有数千年的历史,她是流域内百多万人民赖以生存的生命之水。三要用科学发展观的视点,遵循人与自然和谐,正视当前存在的问题。四要用创新的思维去解决问题,借鉴国内外成功的经验,反映出21世纪时代的特征,依靠知识和高新技术化解难题。既然石羊河流域地下水、地表水是相互转化的统一体,因此,以节水为主线,流域内上、中、下游都有合理节约用水的责任和义务,建立节水型社会,提高全社会高效用水的功能。将节约用水,视为一个战略性的长远目标。在这样的系统分析、系统管理理念指导下,“禁开荒,慎用地,多采光,少用水,新技术,高效益”的技术路线,能有效地提高用水效率[3]。最近,武威领导带领干部到以色列考察参观,在总结中找到了节水的巨大潜力,看清了努力的方向。武威人通过自己的实践也找到了办法,积累了经验,生动的典型案例使得学有榜样。最为可喜的是,一大批领导干部都成了明白人,把管理水、节约用水放在了系统科学认识的高度,把局部困难和需求同整体利益和发展结合起来,把眼前问题和长远的前景统筹计议,有力的管好水的措施,证明把握住了系统科学宏观指导的要义,有了新认识和新思路[4]。

二、钱学森关于21世纪将在中国出现第六次产业革命的超前预见,显示出系统科学思维的战略导向作用

1986年1月7日,钱学森在学术报告中(《我对系统学认识的历程》)说:“我们不能再犯错误,或者尽量地少犯大错误,不要犯大错误。那我们必须有预见性,这预见性来自于什么?来自于科学!这个科学是什么?就是系统科学!”

20世纪80年代中钱老用系统科学观点和方法,对于社会经济形态的发展阶段做了划分,并明确预见在21世纪,中国将迎来知识密集的农业型产业革命。他认为,“大约1万年前在中国出现的农牧业生产是世界历史上的第一次产业革命;大约

3000年前在中国出现的商品生产是世界历史上的第二次产业革命；在18世纪末、19世纪初英国出现的大工业生产是世界历史上的第三次产业革命；在19世纪末、20世纪初在西方发达国家兴起的国家和国际产业组织体系是世界历史上的第四次产业革命；而现在由于新的技术革命所引起的世界范围的生产变革是世界历史上的第五次产业革命。五次产业革命！那么创立农业型的知识密集产业所将引起的生产体系和经济结构的变革，不是21世纪将要在社会主义中国出现的第六次产业革命吗？这难道不是一个值得我们深思的严肃问题吗？”对于即将到来的第六次产业革命，钱老注入极大地关注。 1985年，钱老在《新技术革命与系统工程——从系统科学看我国今后60年的社会革命》又提醒说，“21世纪，中国要以农村为基地发展高度知识密集型的农业型产业，即我以前所讲的五业：种植的农业、林业、草业、海业和沙业。这是21世纪将在中国出现的第六次产业革命。”

钱老还用186封信件，精辟地阐述了他对以生物技术为核心所引发的大农业革命的创建性思维[5]。在论述21世纪将迎来的产业革命时，出于强烈的责任感、坚定的信念和高尚的情操，钱老呼唤人们对即将到来的以农村为基地的高度知识密集型的农业型产业革命给予重视。他在1984年，应中国农业科学研究院的邀请，钱学森同志在院科技委员会会议面向农业科技工作者的报告时，明确提到“还有一项为开发农业型知识密集产业的科学技术，非常重要，但人们还不很重视，不大认识。这就是系统工程，组织管理复杂体系的技术，用到农业生产，就是张沁文同志提倡的农业系统工程。农业系统工程用到今天的农业，虽有一定的作用，不容轻视，但因为现在的农业还没有组织得那么严密，农业系统工程还不能充分显示它的威力。也因此，一旦农业系统工程用到知识密集的农业产业、林业产业、草业产业、海业产业、沙业产业就能大显身手，不但在体系的组织，而且在日常生产调度上，都会显示其威力”。并指出，为了树立重视农业型知识密集产业的概念，为了培养新型农、林、草、海、沙的专业人才，“创办理农综合大学”，“设农业系统工程系，还要分五个专门化：农业产业、林业产业、草业产业、海业产业和沙业产业”。

农业是地球上最大的太阳光能利用的产业。农业是一个露天工厂，植物性生产的过程，是生命体通过光合作用固定和转化太阳能的精密化学反应，制约和参与的因子和要素，既是多维的，又是自然的，既是人们可以掌握和控制的，又有许多依赖于天候。这样，农业生产，就是一个复杂的系统工程，认识农业，就是一门系统科学。目前，人们还没有找到一种手段和物质，能比绿色植物的光合作用更有效、更大量、更经济合算地固定和转化太阳光的能量。绿色植物的光合作用能将二氧化碳和水、矿物质这些无机物合成为有机物，并释放出氧气。地球上所有的生命活动都是靠降解有机物来获取能量和物质的。如果光合作用停滞，地球上的大多数生物将在几年内消失；相反，地球上光合作用的加强，会保障地球表层生命活动的持续发展。钱老关于第六次产业革命的理论把光合作用放在农业型知识密集产业的核心地位，寄托

了很高的期望。用系统科学的思维做出的预示性的判断，对未来进行的描述，对未知做出的暗示，今日看来，其中虽然有朦胧、模糊的要素，但是，系统科学告诉我们，复杂的系统尽管复杂，尽管多维多重的连结构成了无止境、无边无际的多角扩张，但是，因果、来由，却是严格和严密的。第六次产业革命的理论，不仅具有预见性的理论品格，更具有实践应用的可靠性。今天，人类已经跨入了 21 世纪的门槛，农业、农村、农民问题，仍是中国发展进步中迫切需要解决的关键问题。钱老 20 年前对迎接第六次产业革命的论述，在目前更有迫切的现实指导意义，更值得引起广泛地学习和重视。

第六次产业革命的理论中提出了沙产业概念，对于沙产业的论述，虽然语言十分简明扼要，却深刻明晰。10 多年来，在钱老亲切指导下，促进沙产业基金先后出版 100 多万字的文集，建立试验示范基地，开创了沙产业展览馆，丰富了沙产业理论的内涵，完善着沙产业学科构想[6]。沙产业理论已逐渐被实践证明，为群众干部所接受，成为干旱半干旱地区谋求发展的正确抉择。

钱学森第六次产业革命的理论，有重大的导向意义，对干旱、半干旱地区尤其如此。自古以来，由于自然地理条件的特殊（流行传染病少，猛兽活动困难，食物保存容易，气候干热……），干旱、半干旱地区曾是人类的早期先人居留地之一。反映古代文明和宗教文化的圣地，有不少正是位于干旱、半干旱区。但干旱少雨的气候，盛夏的高温，地表为流沙或戈壁，这样一些极为严酷的生态环境条件，决定了荒漠地区天然生态系中构成第一性生产的植被既低矮又稀疏，生产力低下。由于人口增多，需求增大，使自然平衡破坏，环境恶化，造成人类文明的失落。近百年来，随着开发能力和手段的进步，人类不当的开发力度加剧，从而引发了土地退化，酿成了举世瞩目的干旱半干旱地区土地荒漠化的发生、发展。

“荒漠化既是一个环境问题，也是一个发展问题。”长期以来，荒漠化一直折磨着干旱和半干旱地区。人既是引起土地荒漠化的主要原因，又是受害者。“贫瘠的土地上产生贫穷的人群，贫苦的人们制造贫瘠的土地”（西非谚语）。过度放牧、过度种植、毁林开荒、垦殖草原以及对水资源的使用不当这类不适当地利用土地方式，已被证实是引起土地荒漠化的社会经济原因。长期以来人们期望以增大植被覆盖面积、建设防护林网有效地降低风速，作为防治土地荒漠化的有效措施之一。但是土地荒漠化是人类开发活动与自然资源不协调的结果，是社会发展的综合问题，需要的是针对产生原因有效地调整人们开发活动强度和类型。由于所采取的防治荒漠化行动多半针对后果，而不是排除形成的原因，因而，治标不治本，加上干旱荒漠地区由于水分短缺提高植被覆盖率不仅需要大量的资金投入，而且植物的成活及生长都受制于复杂的天然和人为因素，一般成效不理想。近年来，国际社会不断有人对已采取的防治荒漠化的对策提出异议，联合国环境规划署执行主任特普弗 1998 年 6 月 16 日在内罗毕说：“目前，尽管世界各国采取了许多措施对付荒漠化问题，但许多项

目收效甚微，世界土地荒漠化趋势仍然有增无减。究其失败的原因，主要在于这些项目绝大多数往往仅有宏观计划而无具体实施方法，忽视地方社区的参与和急功近利等等。”印度总理拉奥(1994年5月23日)也说：“像印度这样的穷国(约有70%的人口靠农业为生)必须要找到开发那些不毛之地的新方法。”“无论干旱、洪涝，还是贫瘠的盐碱地，都是一般性方法所不能解决的。”

在未来的50年中，由于人口增加是大基数的倍增，赖以土地为生的人类，生存的空间会急剧地变小，就会有超出往昔的危机后果出现。面对快速增加的人口，需要寻找养活人口的土地，于是领域广袤人烟稀少的荒漠必然成为被开发的新空间。在反思过往干旱地区开发中的成败得失时，人们已开始质疑已往的失算和失误，迫切需要新的理性的干旱荒漠开发的策略指导。钱老以系统科学思维提出第六次产业革命中关于沙产业的理论，就是为人们准备了开发干旱荒漠的创新战略。

沙产业理论认为干旱荒漠地区是一个阳光最充沛的载体。具有阳光优势，就是具备了一个本质意义上的“源”。地球表层上的许多非生命现象，例如风云变幻、江河奔腾和大地上、水体中无以计数的动植物、肉眼看不到的微生物的生命现象，这些世界上生命个体和非生命现象的汇流，归根究底都可以看作是能量的流动和能量形态的转化、转移。不管能量流的表象是多么样的形形色色，究其能的来源，都只有一个最初的源头。这个源，这个地球表层上能源的入口，就是太空赐予的阳光。按照钱学森第六次产业革命的理论，沙产业是利用光合作用固定太阳能生产产品的产业之一。干旱荒漠地带是坐落在地球表层赤道南北回归线附近阳光最为充沛的地区，有着发展农业型产业的最高生产力要素。沙产业不要求改变荒漠的地理特征，沙产业的目标就是更多的、最大量的固定和转化太阳能。谁人把握住了这个源头，把“取之无禁，用之不竭”(苏轼语)的天赐能源最大量的留存下来，谁就掌握了要义。得阳光者得未来。

虽然荒漠戈壁地区的阳光能总量是非常巨大的，但单位面积上的强度却不高，由于太阳能固有的特殊性，时至今日，人类对太阳能的利用率也很低。由于地球公转和自转的结果，单位面积上获得的太阳能辐射量极不衡定。加之太阳能是不尽相同波长辐射的总和，可见光也只占一半，所以沙产业理论把捕捉阳光提高光合作用效率的潜力寄托在众多高新技术的集聚应用上，沙产业是知识密集型的大农业。“我们运用全部的现代科学技术，包括物理、化学、生物学这样的基础科学，能不能让这16亿亩的沙漠戈壁每年也提供几千亿元的产值呢？有没有这个可能，这是个很值得研究的问题。这也是我在1984年冬天提出来的，叫做知识密集型的沙产业。”(钱学森，《发展沙产业大有作为》，1991年3月11日在沙产业研讨会上的讲话)

目前最常用的多采光的措施，是利用新材料构筑一个能起隔离作用的膜或壳。这种薄膜或介壳，有很好的阳光通透性能，但不利于水、热的散失。广泛采用的种植地的地膜覆盖和农业设施地的塑料大棚，都是这种作用的形态。正是由于这种措施

改变了水热交换的原始自然状态,起到了多采光少用水的效果。目前在河西走廊的戈壁滩上,在我国东部的沙荒地上,相继建成了成片的塑料大棚。在往昔的农闲时节,大棚里也能长出绿油油的作物。一个简单的大棚改变了束缚作物生长的自然条件,正所谓"地不分南北东西,时不分春夏秋冬"。增加单位受光面积上进行光合作用的叶绿体的浓度,把可能散失的光(透漏的、反射的),都想法利用起来,以及用微型藻类这种新的太阳能转化器代替传统的作物,以便构筑一种流水线式的叶绿素工厂,最大量地提高单位受光面积上的叶绿体数量,都是增加太阳能利用率的技术措施。

沙产业的目的是变不毛之地为沃土,这一目标的达成的标志是完成好四个任务。

第一个任务是高产。这里所说的"高产",是为对比而特别界定的一个概念,指的是在阳光照射的单位面积上,固定转化太阳能的高效率。表达识别这个效率的高低,可以有各式各样的方式和单位;也可以设置一个方便于统计的衡量尺度,例如在一平方米的受光土地面积上,一年之中,能产出多少克蛋白。例如土库曼科学院科研生产联合体《太阳》,长期从事微型藻类的开发利用,他们的数据是:一个生产季节,从 1 公顷的阳光照射面积上,可以获取 60 吨微藻干粉,含 30 吨蛋白。比目前全世界玉米的平均产量多 20 倍的蛋白。沙产业视微藻生产为最有潜力的实现变不毛之地为沃土的有效途径。第二个任务是优质。第三个任务是产业化。第四个任务是经济效益和优化环境双赢。

完成沙产业面对的任务和要求,唯一的出路是用人类的智慧创建一种新的生态系。沙产业的技术路线就是创建新的生态系统的方法、手段和谋略。沙产业的技术是人工改变和控制生境条件的手段,沙产业的装置是人工的知识密集型的生产线体系,但这种人工生产体系的核心,生物反应器中的主体,是大自然的恩赐:附着在植物生命体上的叶绿素。沙产业是光合作用产业,这样的理念,以及由此导引出的方法和手段,是创建的沙产业技术装置的最大开拓优势。认识沙产业常青的生命力,首先要理解的就是我们不但不违背自然的法则和固有的规律,而且相信,阳光,这是大自然给予沙产业最基础、最永恒的本源;无论是对沙产业的科学,还是变学说为行动方式的技术,都是渊源于阳光的充分利用。干旱荒漠的不毛之地上,人烟稀少,不是阳光缺少,而是没有一种便捷的手段、一个灵巧的装置把太阳能截留储存下来。沙产业的技术,是集成的,集纳、合并、汇总,根据沙产业的任务和要求加以组装,"集大成"。

近十年来经过示范区的初步实践证明,沙产业理论不是一种远不可及的科学构想,有现实的可操作性。更多的人已经认识到,发展沙产业是防治土地荒漠化的根本措施,是干旱荒漠地区人民群众脱贫致富的突破口。沙产业的建成与开拓发展,还有半个世纪的跨度空间,用钱老教授给我们的系统科学方法去探索,分析和解决

发展过程中存在的问题，持续不懈地与时俱进，沙产业理论就会保证常青，发扬无限的生命力。在边远的荒漠地区迎接第六次产业革命的到来。

钱学森先生20年前对将出现的新的产业革命，即以微电子、信息技术为基础，以计算机、网络和通信为核心的信息革命的阐述，已经变为今天生活的现实；事实也定将证明，钱老关于第六次产业革命的预言，将迎来21世纪知识密集型大农业在中国的形成和发展。

参考文献

[1]《包兰铁路沙坡头段固沙原理与措施》，中国科学院沙坡头沙漠科学研究站，1991，银川：宁夏人民出版社。

[2]《刘恕委员的发言——必须高度重视内陆河流水资源的统筹管理》，政协八届五次会议大会发言材料之102，1997年3月3日。

[3] 胡全基：《落实科学发展观 实现人与自然和谐——访中国科协原副主席、我国著名资源保护和沙漠化防治专家刘恕》，《武威日报》，2006年7月12日。

[4] 张绪胜：《坚定走科学发展之路，绝不让民勤绿洲消失》，《甘肃日报》，2005年11月20日。

[5]《钱学森论第六次产业革命通信集》，刘恕，涂元季编，中国环境科学出版社，北京，2001年10月。

[6] 刘恕主编：《沙产业概述——沙产业系列论文集之四》，中国环境科学出版社，北京，2001年3月。

基于网络的虚拟现实系统可扩充性问题研究

许晓鸣[1]　吴言华[2]
1 上海理工大学，上海系统科学研究院，上海，200093；
2 上海交通大学，上海，200030

一、引　言

随着计算机和通信等技术的飞速发展，人类正向高度信息化的社会迈进。目前的研究成果和发展趋势表明，有两项技术将对未来信息社会产生重要影响，并将最终改变人类的生活和工作方式，这就是互联网技术和虚拟现实(VR，Virtual Reality，或 VE，Virtual Environment)[9]。

今天，国际互联网 Internet 将世界上的人们紧密地联系在一起，通过网络越过地理上的分隔，人们可以共享资源，互通信息或就特定的问题进行讨论、协作。虚拟环境[1]是具有空间和时间特性的数字化多维信息空间，是虚拟现实技术发展的新阶段。虚拟环境由具有物理特性的实体、参与交互的人及其存在的环境构成，三者之间存在交互关系。虚拟环境仿照现实世界，采用视景系统、音响系统、力反馈系统为参与者提供主要感觉的模拟。虚拟环境代表着未来的计算机交互界面，是一种完全沉浸式的交互界面，用户仿佛真的处在计算机生成的世界里，不管看到的、听到的、还是感受到的，都像是在真实世界里一样，并且用户还可以用完全自然的方式向计算机发出命令。目前，虚拟环境技术已在医学、军事、航空、机器人、制造业、建筑、教育及娱乐等众多领域得到成功的应用。

基于网络的虚拟现实系统(又称分布式虚拟环境，DVE)就是把这两项技术结合在一起，在一组以网络互联的计算机上同时运行 VE 系统的技术。在这个虚拟环境中，位于不同地理位置的多个用户或多个虚拟环境通过网络相连接，共享信息，实现人机交互，动态仿真。在这个虚拟环境中，人们将面对实时、立体的三维图形显示，三维空间声音渲染，以及和谐、自然的人机交互界面。使人可以参与和沉浸在计算机创建的虚拟世界中。利用这个环境，人们可以仿真现实世界中早已发生、正在发生和尚未发生的事件。这样，“在网络上漫游”就不再是一个比喻，而是一种真实的生活。人们可以真正“进入”计算机，通过网络到达地球的任何一个角落，完成协同工作。

关于分布式虚拟环境的定义最早由 Singhal 和 Zyda 教授在 1995 年给出：“一个

可以支持分布于世界各地的多个用户进行基于网络的实时交互的软件系统”[8]。图 1 给出了 DVE 系统的示意图[3]，其中，共有四个客户通过网络参与到 DVE 系统的虚拟环境中，每个客户在其他客户的系统空间中都有一个“化身”(Avatar)。化身对象通过定期的网络通信保持与真实对象的状态同步。因此，所有客户的虚拟空间是一致的。就客户的个人感觉来说，他分不出其空间中的其他对象在本地还是远端，即系统对于客户而言呈现出“透明性”特征。就整个系统而言，所有地理上分布的客户通过本地计算机和网络共同建立了一个虚拟空间，并在这个虚拟空间中进行“透明”的交互活动。

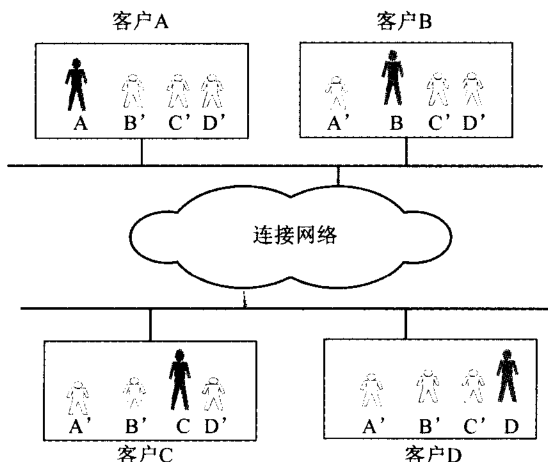


图 1　DVE 系统示意图

分布式虚拟环境综合应用了计算机网络、图形图像处理、多模式人机交互等多项高新技术，在许多领域得到了应用，主要包括：军事仿真系统[6,7,10]，在线游戏[2,4,5]，数字娱乐[12,13]，远程教育[14~17]，电子商务[18]，协同设计与制造[19~23]，视频会议[24]等。DVE 在应用和商品化方面有着巨大的发展潜力，并将对信息技术产业产生深远的影响。因此，分布式虚拟环境研究一直是虚拟现实研究中的一个重要领域。

二、分布式虚拟环境

（一）分布式虚拟环境的发展历程

分布式虚拟环境的发展最早是从国外关于军事团体仿真的研究与应用开始的。1983 年，美国国防部高级项目研究计划局(DARPA)和美国陆军共同制订了一项合作研究计划，即 SIMNET(simulation networking)研究计划[11]。该计划的目的是借助于网络技术，实现从单机仿真训练到团队仿真训练的转变。到 1989 年，已将分布在美国和德国的 11 个军事基地的 260 多个地面车辆仿真器互联，形成了世界上第一个分布式虚拟战场环境，用于进行复杂战场任务的训练。根据使用 SIMNET 过程中积累的经验，美国军方和工业界在 SIMNET 基础上，共同倡导并着手建立异构型网络互联的分布交互仿真(DIS，Distributed Interactive Simulation) 系统，把它

作为美国面向21世纪的一种信息基础设施。在美国,DIS的研究和发展很快。1992年3月,在第六届国防DIS研讨会上,美国陆军的仿真、训练及装备司令部STRICOM(Simulation, Training and Instrumentation Command)提出了DIS结构,并从第一届研讨会开始着手制订DIS的协议标准。1993年,DIS Version 110 PDU协议规范正式成为IEEE标准(IEEE 1278)。DIS是规模更大、功能更丰富的分布式虚拟环境,VR技术是其中重要的应用技术之一。

作为SIMNET的发展系统,美国海军研究生院开发了NPSNET系统[25,26],用来进行战场环境仿真。在1992年的I/ITSEC会议上展示了一个DIS演示系统,30多台全任务模拟器、计算机生成兵力和指挥控制系统,采用DIS PDU标准,通过以太网相联,环境背景模拟太平洋附近的军事基地及邻近海域。1993年的展示规模则进一步扩大,包括来自30余家组织的50多台模拟器,其中还有一些真实实体和位于远地的模拟器参与了演练。从1994年开始,美国DARPA与USACOM联合开展了战争综合演练场(STOW, Synthetic Theater of War)研究[11],主要研究更大规模的高精度仿真对军事仿真训练与战场任务演练的支持,形成了一个包括海陆空多兵种、有3 700个仿真实体参与地域范围覆盖500×750km的军事演练环境。2004年,美国进行了一个名为MC02的联合综合演练实验,这是一个基于C4ISR现场指挥系统与计算机仿真的分布式虚拟战场系统进行的联合军事演练。JSIMS系统支持指挥自动化C4I系统与基于分布式虚拟环境M&S系统之间的互连互通。

表1　国外DVE系统比较

参数 \ DVE	NPSNET	CAVE VPS	DIVE/COVEN	MASSIVE	mWorld	Spline	VLNET
3D环境	是	是	是	是	是	是	是
文本	是	否	是	是	否	否	是
音频	否	是	是	是	是	是	是
视频	否	是	否	是	否	否	是
延迟(ms)	100/300	100	200	200	200	200	100
通信模式	M	M	M	M	M	M	U
可靠性	否	否	是	否	是	是	是
网络协议	Ipmc	Ipmc	SRM/Ipmc	Ipmc	TCP/IP	SRM/Ipmc	TCP/IP

注:M—Multicast, U—Unicast。

美国国防部(DoD, Department of Defense)在DIS标准制定十年后,发展了另外分布式虚拟环境的标准HLA(High-Level Architecture)用来代替DIS标准。该标准的主要目的是提高系统模型和仿真组件的交互性和代码重用性。HLA允许

用户在特定的系统条件下制订自己的对象模型并提供了对象交互的基准服务(RTI,Runtime Infrastructure)。与DIS下对象通过广播方式交互信息不同,HLA允许用户确定自己的交互信息,数据传输方式以及是否时钟同步等。

发源于军事仿真的分布式虚拟环境技术在民用方面也得到了发展,具体体现在商业应用和数字娱乐方面。所开发的应用系统主要包括视频会议,协同设计,多玩家在线游戏等等。

在欧洲,瑞典计算机科学学院开发了DIVE(Distributed Interactive Virtual Environment)[27],用来进行商业协作和视频会议。在此基础上,发展出面向专业与家庭用户的商业虚拟平台－COVEN(Collaborative Virtual Environments)[28]。诺丁汉大学开发的多用户DVE系统分别为:MASSIVE(Model, Architecture and System for Spatial Interaction in Virtual Environments[29,30], AVIARY[31], PARADE[32]。而mWorld[33]是一个多用户实时3D动画编辑和制作系统。

在日本,三菱电气研究实验室基于SPLINE(Scalable Platform for Large Interactive Networked Environments)[34,35]开发了虚拟"钻石"公园,用于模拟多人参与的进行脚踏自行车及其他交通工具在公园游览的活动。同时,三菱实验室开发的VLNET(Virtual Life Network)[36]试图建立真实的虚拟人仿真。

在国内,在国家"863"计划支持下,由北京航空航天大学、杭州大学、中国科学院计算所、中国科学院软件所和装甲兵工程学院等单位共同开发的一个分布式虚拟环境基础信息平台,(DVENET, Distributed Virtual Environment Network),为我国研究分布式虚拟环境提供了必要的网络平台和软硬件基础环境。它主要包含了一个专用计算机网络,以及支持分布式虚拟环境研究与应用开发的各种标准、开发工具和基础数据(如三维逼真地形)。目前,基于DVENET开发的一个分布式虚拟战场环境,将分布在不同地域的若干仿真器联合在一起,并应用虚拟现实技术研制了一些虚拟的武器仿真平台,构成了一个可进行异地协同与对抗战术仿真演练的分布式虚拟环境。从1996年到2005年,分阶段滚动地研究开发分布式虚拟现实应用系统开发与支撑环境,其中包括网络平台、通信软件工具、应用程序框架、逼真自然环境生成、虚拟实体和计算机生成兵力、演练管理器和人机交互等方面的研究。

国内其他计划和项目还有国家973计划支持下的"分布式虚拟环境的基础理论、算法及其实现"项目,清华大学开发的虚拟装配支持系统VASS,浙江大学开发的虚拟设计和虚拟装配系统VDVAS,北航与合作单位共同研制的异地协同虚拟设计和虚拟制造系统VEADAM等。DIS－Link[姚李黄 2000]是国防科技大学军用仿真技术研究室开发的功能完备的DIS仿真支撑软件系统,该软件能够运行于PC/win95/ win98/NT和SGI/ IRIX系统平台上,对符合DIS的IEEE1278. 121995标准的仿真演练开发提供全面的支持,在此软件基础上,用户可以方便快捷的开发DIS仿真应用程序。

分布式虚拟环境包含的技术主题从大的方面可以分为两类:网络相关的技术与虚拟现实相关的技术。网络相关的技术包括:网络通信、多用户交互与协作、系统组织结构、负载管理与控制等。虚拟现实包括的技术主题有:图形图像处理、游戏(仿真)建模、人工智能、游戏(仿真)引擎等。其体系结构如图 2 所示。

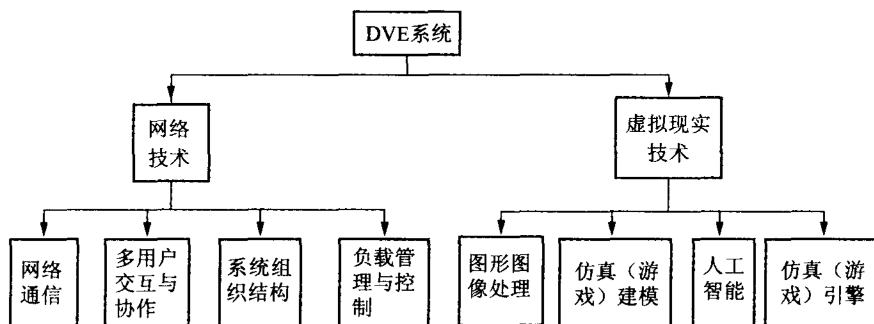


图 2　DVE 系统技术主题

（二）分布式虚拟环境发展面临的主要问题

由于 DVE 系统是由网络连接而成的,因此网络的性能对 DVE 系统至关重要。系统的网络带宽决定了 DVE 系统的规模。当系统规模(客户数目)增大时,相应的对网络带宽的要求也增加了。DVE 系统支持多个用户之间视频,音频,以及 3D 模型数据交互,需要大量的网络带宽。尽管现代家用宽带网络已经得到很大的普及,但是由于普通的家用带宽一般限制于 T1 网络(1.5Mbps),只能一定程度上减少网络带宽对 DVE 系统规模的限制。相对于大规模的 DVE 系统而言,网络带宽越大越好,这有待于下一代高性能宽带网络的发展。因此系统可扩充性问题是 DVE 系统当前面临的主要问题,采用各种软、硬件技术解决该问题将会为大规模 DVE 系统的发展产生有力的推动,具有重大的意义。

三、分布式虚拟环境规模可扩充性问题

对于大规模 DVE 系统的可扩充问题,由于 DVE 系统的实时性要求,任何由服务器过载导致的系统延迟问题都会影响系统的性能。这个问题一般有两类解决方案,第一类是通过增加硬件的方法实现系统扩容,如多服务器并行分区方法。这种方法的基本思想是以牺牲硬件费用为代价实现系统扩容。另一类方法是通过减少通信负载来实现系统扩容,主要包括 AOI 技术,DR 算法和组播技术。AOI 是利用虚拟环境中的参加者一般只跟周围临近的对象打交道这一系统特征,通过只给临近

的对象发送状态更新数据并忽视远方对象的方法来减少通信负载。DR算法的实质是以部分的牺牲系统一致性的方法来实现通信优化。组播技术是通过对系统用户之间的网络拓扑的优化,选取最优的通信路径,并实现部分顺序发送的方式来实现网络负载的优化。

(一)多服务器并行分区技术

在DVE系统开发中,客户/服务器结构是应用最广泛的结构。最早的客户/服务器结构一般用一台主机作服务器,所有客户端都连接到服务器上并通过服务器来实现通信交互。当系统客户增加到一定程度,服务器自身的运算能力和所处网络环境的通信带宽变得匮乏,导致系统出现过载,延迟增加,最终影响系统的性能和显示质量。为了解决这一问题,一个容易想到的方法是采用多个服务器并行的方法来分担系统负载。一般的做法是把整个虚拟空间分割成多个分区,每个分区由一台服务器负责管理[37~40]。在RING系统[37]中,虚拟环境实现了静态分区,每个分区由一台服务器负责,系统拓扑如图3所示。通过多个服务器的并行,系统可以在大负载的情况下保持实时性能。但是这种结构仍然存在局部过载问题,即在总体系统未饱和的情况下,由于过量用户聚集在单个服务器上从而导致单个服务器出现过载,称为局部过载。

针对这个问题,许多负载平衡算法被提了出来。一种方法是在多个服务器之间平衡用户负载[38,39]。如在NetEffect系统[38]中,虚拟空间根据客户密度分成多个区域,每个区域由一台服务器管理。而一台主服务器通过动态改变各个分区服务器的管理区域来维持多个服务器之间的负载平衡,降低过载出现的概率。系统结构如图4所示。其存在的不足主要是分区之间是独立的。用户不能"透明的"跨分区自由移动。这类系统可以看作多个小的C/S系统的组合,这打破了DVE系统的"透明性"特征。同时,主服务器的存在难以避免系统性能瓶颈和单点错误。

另外一种方法是通过把每个服务器负载的分区再次划分为小面积的网格,并通过在分区之间移动边界网格实现负载迁移[42]。这种移动是在各个分区服务器后台实现的,对于用户来讲是透明的。因此保证了DVE系统的"用户透明"特征。但随之而来的问题是负载迁移波动问题和负载迁移环形级连问题。设想在两个临界过载的分区之间的负载迁移情况。过载分区A将部分网格迁移给濒临过载的分区B从而变得不过载。分区B由于接收了这部分网格变得过载了,同时发现分区A不过载,于是部分区域网格又回迁给A。这个过程可能会重复出现导致迁移波动问题。考虑另一种情况,假设系统禁止B将过载的部分回送给A,而是发送给其相邻的未满载的服务器C。C发送给D,最后D又发送给了A,从而出现一个负载迁移环。最后,即使不出现迁移环,这种由于一个服务器出现问题而导致在多个服务器之间出现负载迁移的现象会极大的影响系统性能。

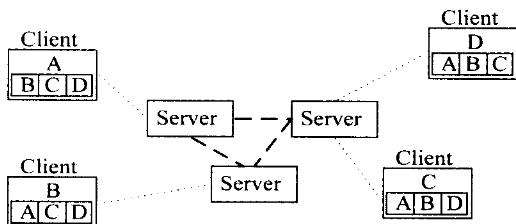


图 3　RING 的结构

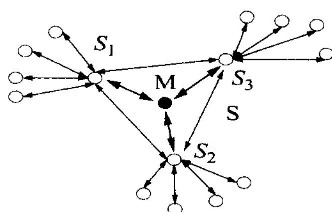


图 4　NetEffect 的结构

负载平衡算法本身有其内在的缺点：首先，DVE 系统是一个高交互性的应用系统，很难频繁的执行负载平衡算法。其次，负载迁移是个费时的过程，这增加了平衡负载所需要的时间。再次，迁移波动现象和迁移级连现象增加了系统开销。

针对负载迁移算法存在的问题，一种负载共享算法在[41]中提了出来。较之负载平衡算法的先过载再平衡的思想，负载共享方法试图通过避免出现过载来解决系统局部过载问题。这种方法的好处是避免了负载迁移带来的庞大系统开销。但是由于服务器之间的松耦合连接现状，处理负载分配变得异常困难。

文献[42]给出了另外一种以时间延迟为指标的启发式算法来进行全局的网络负载分配。虚拟空间被映射为一个图：G=(V,E)。V 表示系统内的所有用户，E 表示用户之间的连接。系统在必要的时候通过全局的启发式计算来确定最优的网络拓扑结构并根据计算结果来调整系统连接。其存在的明显缺点是计算过程和调整过程耗时巨大，尤其是当系统规模变大时候更为明显，因此不适合实时性系统的要求。

总之，尽管多服务器并行分区的方法不失为一种解决大规模分布式虚拟环境系统的可行的方法，许多大型的商业 DVE 系统采用了这一结构[2,43,44]，但是由于仍然存在上述缺点，限制了它的应用发展。

（二）DR 算法

在 DVE 系统中，DR 算法是用来减少网络通信量的基本算法并被大多数 DVE 系统所采用[2]。最早的关于 DR 算法的讨论来源于分布式交互仿真（DIS，Distributed Interactive simulation）[45]中关于交通工具的移动仿真的研究。其基本思想是在真实状态与预测状态之间误差超过设定限度之前不进行状态同步从而避免了大量状态刷新数据的发送。首先来考虑 DVE 系统维持“用户透明性”，即用户对象及其化身之间状态一致性的机制。假设系统由用户 A，B，C 组成。在 A 的虚拟空间中，B 和 C 分别有一个化身（avatar）：B′，C′。为了保持 A 端与 B，C 端的视野同步，B 和 C 必须在一个非常小的周期（由于人体肉眼的反应特征，该周期一般小于 250ms）内将自身的状态变化通知 A。A 用接收到的状态信息来更新 B′和 C′的状态从而保证

B与B′,C与C′的状态一致。即B,C的状态相对于用户A而言是“透明”的。

DR算法的前提思想是用户的状态发生突然变化的概率很小。执行过程如下：首先,DR算法预先设定一个状态预测公式,并规定一个可以接受的最大误差值。其次,在运行过程中,B和C不是每个周期都能从A那里得到A的状态更新消息[46]。在没有得到更新消息的周期内,B和C利用预定的预测算法和旧的A′值来推测新的A′的状态值,从而避免了网络通信的发生。最后,A在调整自身的真实状态的同时也计算预测值并比较两者的差值。当差值大于预先设定的门限时,A发送状态更新消息给B和C。B和C根据接收到的数据执行一定的收敛算法,并在未来的仿真周期内逐步更新A′的状态使之向真实值“趋近”。DR算法从本质上来讲是以部分的牺牲系统一致性的方法来优化系统通信负载,当然这种不一致性被控制在一个系统可接受的范围内的。

在图5所示的例子中,虚线是对象实际运动的轨迹,实线是系统通过预测函数计算出来的路线。可以看到,在保证误差维持在一个可接受的范围内的前提下,整个过程中只发生六次网络通信就能满足系统的要求。

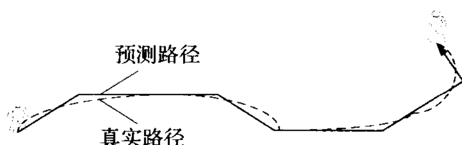


图5　DR算法曲线

（三）AOI技术

DVE系统拥有一个巨大的虚拟空间,但是对于空间中的单个实体对象而言,其一般只对部分虚拟空间感兴趣。也就是说单个实体一般只能感知和影响其周围有限距离内的实体对象。这个有限距离所决定的区域为实体所感兴趣的区域,称为AOI。在系统运行时,实体主要跟其AOI域内的对象进行通信交互并忽视其他的对象。通过只给部分对象而不是全部对象发送消息可以有效地减少系统通信量。节省的网络带宽可以用来支持更多的用户,从而提高了系统的规模。图6给出了一个基于AOI交互的例子。其中A与B的AOI交叠,在A中有B的一个化身B′,同样在B中有A的一个化身A′。通信发生AB之间以维持A与A′,B与B′的状态一致。同样的事情发生在B与C之间。而A与C之间没有发生AOI的交叠,因此,系统认为A与C相距较远且互不干涉。因此,A中无C的化

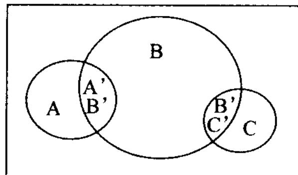


图6　AOI示意图

身,C 中也无 A 的化身,AC 之间不发生通信,相对于把状态信息广播给系统所有的用户而言,这种方式可以极大的减少网络通信负载。

AOI 思想在其他技术里面也得到了应用,例如在上一节中谈到了基于 AOI 的变门限 DR 算法。而在下一节中将谈到基于 AOI 的多树组播技术。因此 AOI 技术已经成为了 DVE 系统进行负载优化的一项基本技术并得到了广泛的研究和应用。

(四) IP 组播(IP Multicast)

1. IP 组播结构

组播技术来源于分布式网络应用系统对于一对多和多对多通信模式的需求。典型的应用有视频点播系统,分布式仿真和多玩家在线游戏等。这些系统的共同特点是系统规模大,网络通信负载高。传统的单播和广播方式不能提供有效的解决方法。组播技术的出现就是为了解决这个问题。

组播技术可以描述如下:将具有相同兴趣的网络用户组成一个组播组,所有的组成员在结构上被连接成为一个支撑树(Steiner Tree),如图 2. 6 所示。每个组拥有唯一的一个组播地址。任何发送给该组播地址的网络数据包将被发送给组内所有的用户。组播组的建立问题一般可以归结为支撑树的构造问题[47]。组播树一般有两类:一类是基于源的单源组播树[48],一种是基于核的多源共享组播树[48]。

图 7 给出一个基于源的单源组播树的示例:节点 A 为组播源,节点组{A,C, F, I,G,J}构成了一个组播树。其中{A,F,G,J }是组播组成员。组播过程可以描述如下:如果节点 A 希望发送消息给组内所有成员,根据树结构,它的前向节点只有 C,所以它只把数据包发送给 C。因为 C 不是组播组成员,所以 C 仅仅是转发这个数据包。F 是 C 的前向节点,所以 F 接收来自 C 的消息包。F 是组播组成员,需要这个数据包,于是它复制这个包,并把复制包发送给前向节点 I。因为 G 和 J 都是 I 的前向节点,数据包通过 I 转发给 G 和 J。这样,来自于节点 A 的数据包沿着被优化了的树路径按顺序发送给了所有组成员。这种方式比广播方式和单播方式更加节省网络资源。

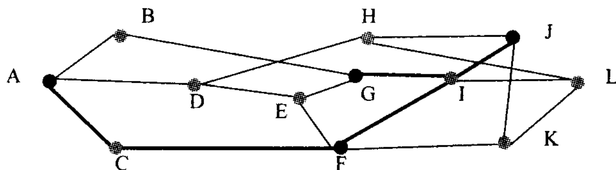


图 7　组播树结构

组播树的建立过程虽然消耗一部分系统资源，但是在建立后可以极大的提高网络传输的效率。因此这种方式适合 DVE 系统的应用。

2. IP 组播在 DVE 中的应用

组播技术可以减少网络负载，可以帮助 DVE 系统在相同的带宽下，容纳更多的客户，提高系统可扩充性。因此，组播在 DVE 系统的开发中得到了广泛的应用。一个应用实例是 DOOM[49]。所有的系统客户被连接成一个基于核的树，如图 8 所示。根节点(核)的选择依据是到各个节点的延迟不会超过平均延迟。消息包通过根节点在全局进行发送。与广播技术相比，该结构可以有效的减少带宽。但是这种结构不能支持规模较大的系统，因为首先，单一树结构决定了当系统规模增大时，根节点到叶子节点的延迟是渐增的。其次，当系统用户规模很大时，根节点的全局选举算法将会消耗更多的时间，从而影响系统的实时性能。

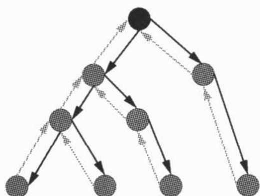


图 8　基于核的组播树结构

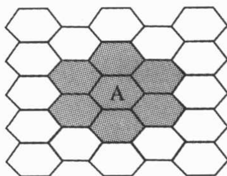


图 9　基于 AOI 的组播

另外一种基于 AOI 的多树结构可以避免这个问题。NEPSNET[50] 系统中，虚拟空间被分成适当大小的六边形，如图 9 所示。每个六边形所占的区域内的客户构成一个组播组。每个实体的 AOI 内的组播组构成一个组播组集合。发送给该组播组集合的所有消息，都会被实体 A 接收到，称为 A 的“接收集”。而实体 A 的状态更新消息，则只发送给 A 所在的组播组。AOI 随着 A 的移动而移动，当 A 离开一个组播组，加入另一个组播组后，其“接收集”随之发生改变。

尽管通过将 AOI 与组播结合起来，增加了系统处理的复杂性，但是 DVE 系统的网络负载优化效率可以得到极大的提高，从而能够支持更大规模的 DVE 系统。

3. IP 组播存在的问题

IP 组播存在以下问题[51～54]：①路由器必须为每个组播组保存状态，扩展性差；②要求所有路由器都支持，不利于推广使用；③用统一的模型来适应所有应用，算法设计困难；④组播组加入、退出和管理等开销大；⑤组播地址空间太小(针对 IPv4)；⑥打破了传统的根据进入流量计费的机制。IP 组播在安全、拥塞控制等方面也存

在问题。

（五）应用层组播

为了解决IP组播带来的问题，许多学者提出了应用层组播的理论[Chu2002]。应用层组播的基本思想是保持互联网原有的简单、不可靠、单播的转发模型，由客户端系统实现组播转发功能[章森2004]。它有一些假设：①网络的带宽和转发资源相对丰富，服务器能力是主要瓶颈；②组播组成员可贡献资源用于转发；③应用对性能要求并不苛刻，可容忍报文丢失和较大延迟。应用层组播的优势有：只需改变客户端系统，便于实现和推广；便于针对特定应用优化。它的缺点为：一般比IP组播使用更多网络资源；客户端系统可能不稳定，导致组播的可靠性受影响；客户端系统性能无法保证，可能导致延迟、转发速率等性能的下降。目前应用层组播研究集中于视频会议系统、媒体流的分发系统（如视频广播）和订阅/分发系统等。它主要用于实时的多媒体传输。这利用了多媒体信息的性质，即在传输链路质量下降时，用户仍可利用收到的低速率或者不完整的信息；也发挥了组播"时间上集中、空间上分布"的特点。

1. 应用层组播与IP组播及单播的区别

应用层组播的概念及其与IP组播，单播的关系从以下实例可以看出[51]。实际网络拓扑如图10-a所示，其中，A是数据源，B,C,D是接收者，要求A发送相同的数据给B,C,D。图10-b给出了单播方式下的通信路径。其网络费用为56。图10-c给出了IP组播的通信路径，网络费用为29。图10-d给出了应用层组播的网络路径，其网络费用为31。容易看出，应用层组播相对于IP组播而言，会产生一定的网络冗余，但是它实现了对底层网络的封装，因此具有更大的应用价值。

2. 应用层组播在DVE系统中的应用

当前的ALM应用主要是流媒体系统和视频会议系统。该类系统的交互通信具有高频率，高数据量，单点发送，多点接收等特点。而由于DVE系统的通信交互具有高频率，低数据量，多点发送，多点接收的特点，因此，考虑把ALM引入DVE系统的通信交互研究具有重要的意义。同时，上面讨论的IP组播在DVE系统中的应用方案，可以为ALM在DVE中的应用提供借鉴。

由于ALM独立于底层网络，因此它的应用前景更加广阔。但是相对于IP组播，应用层组播会增加通信的延迟，这是与DVE系统的实时性要求抵触的。因此，如何建立最优的应用层组播拓扑以满足实时系统的要求是当前ALM研究领域的重点问题。

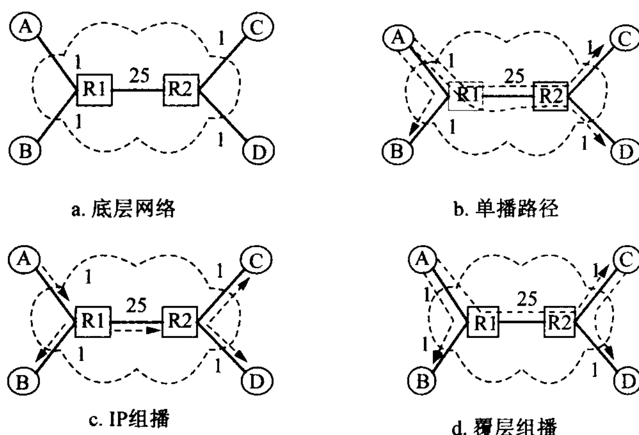


图 10　ALM,IP 组播,Unicast 的关系

四、结　论

本文主要讨论了基于网络环境的虚拟现实技术(分布式虚拟环境)的发展历程,国内外的发展现状,分布式虚拟环境在各个领域的应用,以及其当前存在的主要问题。文中针对分布式虚拟环境系统当前面临的主要问题之一——系统扩充性问题,详细分析了用于解决该问题的各种方法和技术。分布式虚拟环境技术的发展随着宽带网络的发展而在人类社会的生活中占有越来越重要的地位。虚拟环境系统的发展和应用带来了巨大的经济和社会效益,并将最终对人们的生活方式产生极大的影响,因此加强对分布式虚拟环境系统的研究具有重大的意义。

参 考 文 献

[1] 汪成为，高文，王行仁:《灵境(虚拟现实)技术的理论、实现及应用》[M]. 北京：清华大学出版社，1996

[2] M. Abrash. Quake's game engine: The big picture. Dr. Dobb's. Journal. Spring. 1997

[3] Michael Capps, Kent Watsen, and Michael Zyda,Cyberspace and Mock Apple Pie,A Vision of the Future of Graphics and Virtual Environments, Projects in VR,IEEE,1999

[4] Yoshihiro Kawano , Tatsuhiro Yonekura,On a Serverless Networked Virtual Ball Game for Multi-Player, Proceedings of the 2005 International Conference on Cyberworlds (CW'05), 2005, IEEE

[5] Michael Lewis and Jeffrey Jacboson. Game Engines in Scientific Research. Communication of

the ACM, 2002, 45(1)

[6] Michael Zyda, John Hiles, Alex Mayberry, Entertainment R&D for Defense, Web Graphics, IEEE, 2003

[7] D. C. Miller, J. A. Thorpe. SIMNET: The advent of simulator networking. Proceedings of the IEEE, 1995, 83(8): 1114—1123

[8] S. Singha; and M. Zyda, Network Virtual Environments: Design and Implementation, Addison-Wesley, 1999

[9] Stytz M R, Distributed Virtual Environments, IEEE Computer Graphics and Application, 1996, 16(3): 19—31

[10] Tainchi Lu and Guanchi Wu, The War-Gaming Training System Based on HLA Distributed Architecture, Proceedings of the International Conference on Computers in Education (ICCE'02), IEEE, 2002

[11] D. C. Miller, J. A. Thorpe. SIMNET: The advent of simulator networking. Proceedings of the IEEE, 1995, 83(8): 1114—1123

[12] Yasuyuki Okanol, Yoshinori Ito, Tohei Nitta, A Study on The Application of DVE to A Mental Support System for The Aged Segregated From Family, Proceedings of the First IEEE International Workshop on Horizontal Interactive Human-Computer Systems (TABLETOP'06), 2006 IEEE

[13] TeYi Chan, YuLung Wu, BinShyan , Jong Tsong, Wu Lin, Interactive and Collaborative Virtual Learning Environment: Virtual Wildlife Park, Proceedings of the 23 rd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops (ICDCSW'03), IEEE , 2003

[14] Tohei Nitta, Kazuhiro Fujita, Sachio Cono. An Application of Distributed Virtual Environment To Foreign Language. Kansas City, Missouri, IEEE Education Society. October 2000

[15] C. Bouras, A. Philopoulos, Th. Tsiatsos, e-Learning through distributed virtual environments, Journal of Network and Computer Applications, 2001, 175—199

[16] T. Kamolphiwong, S. Kamolphiwong, and C. Siriyuenyong. A Design Framework of Interactive Distance Learning in Distributed Systems, Proceedings of the International Conference on Computers in Education (ICCE'02), 2002, IEEE

[17] P. Park, Distance Education System for English Learning on the Internet, IEEE, 1998

[18] Jun Zhang, Fengsen Li, Hua Li. Multi-user Shared Virtual Reality in the Exhibition of Chinese Nationalities-Virtual Museum of Chinese Nationalities. Computer Supported Cooperative Work in Design, The Sixth International Conference on, 2001, P:83—88

[19] N. D. Georganas, E. M. Petriu, M. Cordea and D. Ionescu, Distributed Virtual Environments for Training and Telecollaboration, IEEE, 1999

[20] R. Subbu, and A. C. Sanderson, Network-Based Distributed Planning Using Coevolutionary Agents: Architecture and Evaluation, IEEE Transaction on system, man, and cybernetics-Part A: system and humans, 34(2), 2004

[21] Qing Wang, Kai Leung Yung, Wai Hung, A hierarchical multi-view modeling for Net-

worked Joint Manufacturing System, ELSEVIER: Computers in Industry, 2004, 53: 59—73

[22] Frederick W. B. Li, Rynson W. H. Lau, and Frederick F. C. Ng, VSculpt: A Distributed Virtual Sculpting Environment for Collaborative Design, IEEE Transactions on Multimedia, 2003, 5(4)

[23] M Durstewitzl, B Kiefner, R Kueke, H. Putkonen, P Repo and T. Tuikka, Virtual Collaboration Environment for Aircraft Design, Proceedings of the Sixth International Conference on Information Visualisation (IV'02), 2002, IEEE

[24] H. Sakamoto, Y. okada, T. Shimokawa and K. Ushijima, Component Based Video Communication Tool for Collaborative virtual Environment, IEEE, 2001

[25] M. R. Macedonia, M. J. Zyda, D. R. Pratt, P. T. Barham, and S. Zeswitz, NPSNET: A network software architecture for large-scale virtual environments, Presence: Teleop. Virtual Environ., 1994, 3(4): 265—287

[26] M. Capps, D. McGregor, D. Brutzman, and M. Zyda, NPSNET-V: A new beginning for dynamically extensible virtual environments, IEEE Comput. Graph. Appl., 2000, 20(5): 12—15

[27] O. Hagsand, Interactive multiuser VEs in the DIVE system, IEEE Multimedia, 1996, 3(1): 30—39

[28] ACTS, COVEN—Collaborative Virtual Environments. Final Report. ACTS Project Number AC040
[Online]. Available: http://www.infowin.org/ACTS/, 1999

[29] C. M. Greenhalgh and S. D. Benford, Supporting rich and dynamic communication in large-scale collaborative virtual environments, Presence: Teleop. Virtual Environ., 1999, 8(1): 14—35

[30] J. Purbrick and C. Greenhalgh, Extending locales: Awareness management in MASSIVE-3, Proc. IEEE Virtual Reality 2000 Conf, 2000, p. 287

[31] D. N. Snowdown and A. J. West, AVIARY: Design issues for future large-scale virtual environments, Presence: Tele. Virtual Environ., 1994, 3(4): 288—308

[32] D. J. Roberts and P. M. Sharkey, "Minimizing the latency induced by consistency control within a large-scale multiuser distributed environment," Proc. IEEE Int. Conf. Systems, Man, and Cyberetics, vol. 5, pp. 4492—4497, 1997

[33] J. M. S. Dias, R. Galli, A. C. Almeida, C. A. C. Bello, and J. M. Rebordão, mWorld: A multiuser 3-D virtual environment, IEEE Comput. Graph. Appl., 1997, 17(2): 55—65

[34] D. B. Anderson, J. W. Barrus, and J. H. Howard, "Building Multi—User Interactive Multimedia Environments at MERL," IEEE Multimedia, 1995, 2(4): 77—82

[35] J. W. Barrus, R. C. Waters, and D. B. Anderson, Locales: Supporting large multiuser virtual environments, IEEE Comp. Graph. Appl., 1996, 16(6): 50—57

[36] T. K. çapin, I. S. Pandzic, N. Magnenat-Thalmann, and D. Thalmann, Avatars in Networked Virtual Environments. West Sussex, U.K.: Wiley, 1999

[37] T. Funkhouser, RING: A Client-Server System for Multi-User Virtual Environments. In proc. of Symp. On Interactive 3D Graphics, 1995, P: 85—92

[38] T. Das, G. Singh, A. Mitchell, NetEffect: A Network Architecture for Large-scale multi-user Virtual World , In Proc. of ACM VRST, 1997, P:157—163

[39] M. Hori, T. Iseri, K. Fujikawa, S. Shimojo, Scalability Issues of Dynamic Space Management for Multiple-Server Networked Virtual Environments. In Proc. of IEEE Pacific Rim Conf. On Communications, Computers and signal Processing, 2001, P: 200—203

[40] Rynson W. H. Lau, Beatrice Ng, Adaptive Partitioning for Multi-server Distributed Virtual Environments. Proceedings of the ACM International Multimedia Conference and Exhibition, 2002, P: 271—274

[41] Rynson W. H. Lau, Beatrice Ng, Adaptive Partitioning for Multi-server Distributed Virtual Environments. Proceedings of the ACM International Multimedia Conference and Exhibition, 2002, P: 271—274

[42] Ta Nguyen, Binh Duon, Suiping Zhou, A Dynamic Load Sharing Algorithm for Massively Multiplayer Online Games, Networks, 2003. ICON2003. The 11th IEEE International Conference on, 2003, P:131—136

[43] John C. S. Lui, M. F. Chan, An Efficient Partitioning Algorithm for Distributed Virtual Environment Systems, Parallel and Distributed Systems, IEEE Transactions on, 2002, 13(3), P:193—211

[44] Ultima Online, available at www. uo. com,2004

[45] Everquest, available at www. everquest. station. sony. com. ,2005

[46] IEEE Std 1278. 1—1995, Standard for Distributed Interactive Simulation Application Protocols. , The Institute for Electrical and Electronics Engineers, Inc. , New York, march 26 1996

[47] Seok-Jong Yu, Yoon-Chul Choy, A dynamic message filtering technique for 3D cyberspaces, Computer Communications, 2001, 24(18):1745—1758

[48] Sahasrabuddhe L. H and Mukherjee B. Multicast routing algorithms and protocols: A tutorial, IEEE Network, 2000,14(1): 90—102

[49] J. Moy, Multicast Routing Extensions for OSPF, Commun. ACM, vol. 37,Aug. 1994. P: 61—66

[50] V. Ramakrishna, Max Robinson, Kevin Eustice and Peter Riher, An Active Self-Optimizing Multiplayer Gaming Architecture, Autonomic Computing Workshop, 2003, P: 32—41

[51] M. R. Macedonia and M. J. Zyda, Exploiting Reality with Multicast Groups: A Network Architecture for Large-Scale Virtual Environments. Virtual Reality Annual International Symposium, Proceedings. 11—1,1995

[52] Yang-hua Chu, Rao S G. , Seshan S, Hui Zhang, A case for end system multicast, IEEE Journal on selected Areas in Communications, 2002, 20(8): 1456—1471

[53] Francis P. Yoid: extending the multicast internet architecture [EB/OL]. http://www. aci-

ri. org/yoid, 1999

[54] Pendakaris D, SHI S. ALMI: an application level multicast infrastructure [A]. Anderson T. The 3rd USENIX Symposium on Internet Technologies and Systems[C]. San Francisco, CA, USA: USENIX Association, 2001: 49—60

[55] EL—SAYED A., ROCA V, MATHY L. A survey of proposals for an alternative group communication service[J]. IEEE Network, 2003, 17(1):46—51

系统工程方法论与方法论系统工程*

孙东川[1]，林福永[1]，孙 凯[2]

1 暨南大学管理科学与工程研究所，广州，510630；2 澳门科技大学，澳门

一、引 言

纵观系统工程在中国的发展历程及横观其发展现状，笔者认为：系统工程是技术是方法，也是一种方法论[3]。

系统工程是技术。“组织管理的技术——系统工程”[1]，这个命题是著名学者钱学森、许国志、王寿云联合署名于1978年9月27日发表在上海文汇报上的一篇重要文章的题目，也是系统工程的最简单明了的定义。

系统工程是方法。文献[1]指出：“系统工程”是组织管理“系统”的规划、研究、设计、制造、试验和使用的科学方法，是一种对所有“系统”都具有普遍意义的科学方法。

作为一大类新的工程技术[2]，系统工程具有特定的方法论，称之为系统工程方法论。影响比较大的系统工程方法论主要有：Hall三维结构，Checkland软系统方法论，钱学森综合集成方法论，物理—事理—人理(WSR)系统方法论。

系统工程本身已经成为一种方法论——这里称之为“方法论系统工程”。

二、系统工程方法论评述

1. Hall三维结构

Hall三维结构(Hall方法论)是提出较早、影响较大的系统工程方法论，它是1968年由当时在美国贝尔电话公司任职的IEEE高级会员A. D. Hall提出来的。Hall三维结构的三维是时间维，逻辑维，专业维。其中，时间维(粗结构)是把一个工程项目的生命周期分为7个阶段：规划，设计，研制(系统开发)，生产，安装，运行，更新。逻辑维(细结构)是把生命周期的每一个阶段分为7个步骤：摆明问题，确定目

---

* 国家自然科学基金项目[illegible]。

标，系统综合，系统分析，系统评价，决策，实施。Hall 方法论并未过时，而是具有很强的实用价值，许多文献对它介绍得不够充分甚至不够准确，有鉴于此，本文要多说几句。

Hall 三维结构如图 1 所示[3]。这里特别要指出：Hall 提出的第三维是专业维，而不是“知识维”，所谓“知识维”是 A. P. Sage 转述的时候写下的，后来流传甚广，可谓是以讹传讹。笔者在 1984 年曾经发表文章[4]专门澄清过。而广泛流传的第三维是“知识维”的三维结构应该称为“Sage 改造过的 Hall 三维结构”。但是，Sage 的“改造”不是改好了而是改差了，他的“知识维”其实没有什么实际意义。Hall 给专业维标注了 8 门系统工程专业，大体上是按照当时成熟的程度排列的。

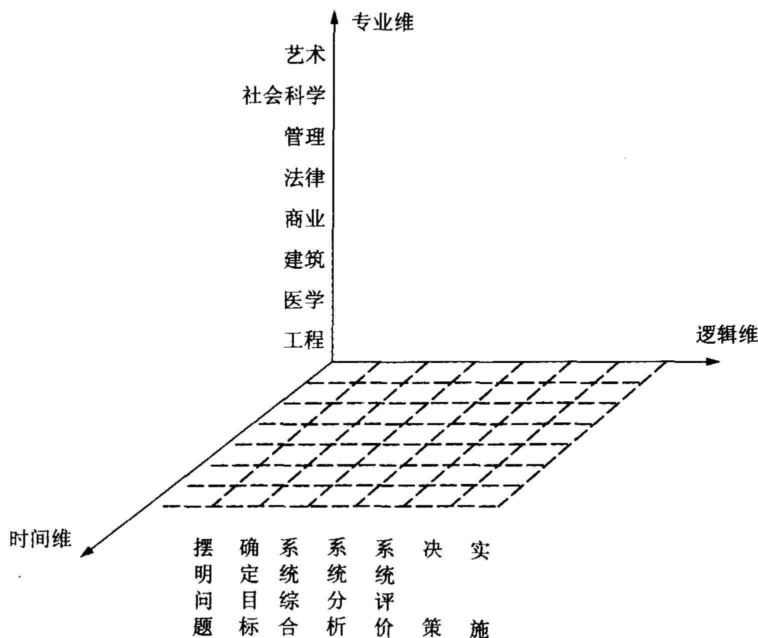


图 1　Hall 三维结构

钱学森院士在 1979 年提出了 14 门系统工程专业，列表以示[5]。他说：“表中列了十四门系统工程，其实还很不全，还会有其他的系统工程专业，因为在现在这样一个高度组织起来的社会里，复杂的系统几乎是无所不在的，任何一种社会活动都会形成一个系统，这个系统的组织建立、有效运转就成为一项系统工程。同类的系统多了，这种系统工程就会成为一门系统工程专业。所以，我们还可以再加上许多其他系统工程专业。”现在，中国系统工程学会下设的专业委员会已经有 20 个，还将产生更多的系统工程专业。我们可以用 14 门专业或者 20 门专业去标注 Hall 的专业维。

Hall 三维结构的时间维与逻辑维构成的二维结构称为“活动矩阵”，也是引述得比较多的。在此基础上，A. D. Hall 还提出了形象化的“神羊角模型”和“超细结构”[6]，如图 2、图 3 所示。

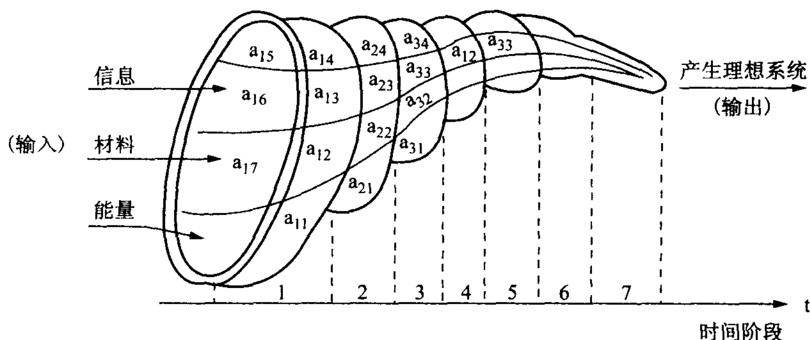


图 2　Hall 神羊角模型

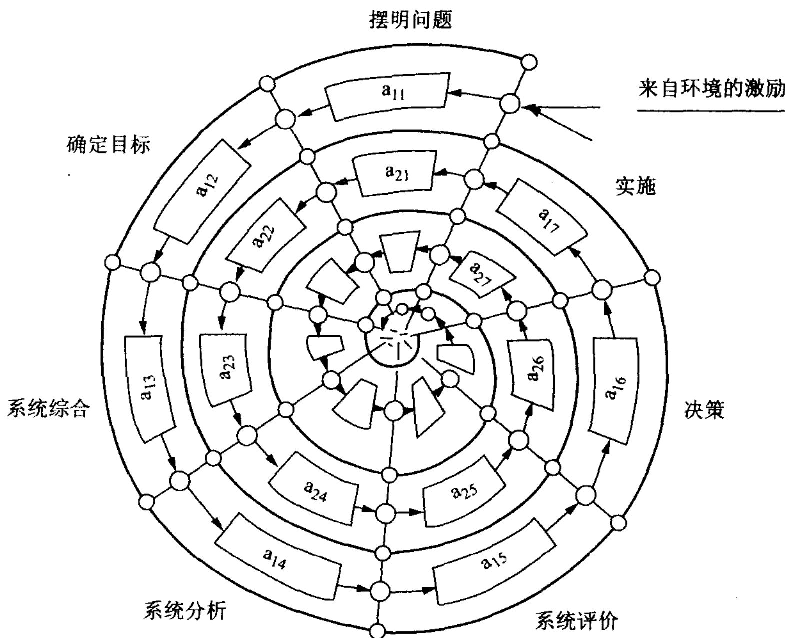


图 3　Hall 超细结构

一个新系统(系统方案)的产生过程具有迭代性与收敛性两大特点。活动矩阵所述的系统工程展开过程可以很形象地借用希腊传说中的丰收女神 Almathea 之神羊角来比喻。如图 2 所示。丰收女神的神羊角原来是说：羊角号一吹，各种财富就

源源不断地涌现出来。Hall 是说，以各种信息、物质、能量从左边输入，通过神羊角螺旋式地加工收缩，最后产生出理想的系统（方案）来。

从神羊角的大口向里看，得到图 3，Hall 称之为系统工程活动的超细结构。它以逻辑维的 7 个步骤为一个循环周期（一个阶段），经过多次循环而汇聚成为理想的系统（方案）。

Hall 方法论的贡献还在于明确了系统分析（system analysis）、系统综合（system synthesis）、系统评价（system evaluation）等概念及其相互关系，这些概念是系统工程的核心概念、标志性概念，可以说，没有这些概念就没有系统工程。

2. Checkland 软系统方法论

1978 年前后，英国学者兰卡斯特大学教授切克兰德（P. B. Checkland）指出，Hall 方法论仅仅适用于“硬系统”，称之为“硬系统方法论”；他针对社会经济系统提出了“软系统方法论”[7]。他认为：从问题的结构与特点来看，问题有良结构与劣结构之分，有硬性与软性之别；一般便于观察、便于建模、边界清晰、目标明确、好定义（well-defined）的问题称为具有良结构（well-structured）的硬问题；而把难以观测、不便建模、边界模糊、目标不定、不好定义的（ill-defined）问题称为具有劣结构（ill-structured）的软问题。良劣之分和硬软之别的关键在于对人的因素的关注程度和对人的价值观、世界观的重视程度；社会经济系统是软系统，其问题是“劣结构的”：一开始可能连“问题”是什么也不明确的，或者是众说纷纭，缺乏共识，只是一堆“议题”（Issues），首先要从议题中找出要解决的问题，然后按照软系统方法论的若干步

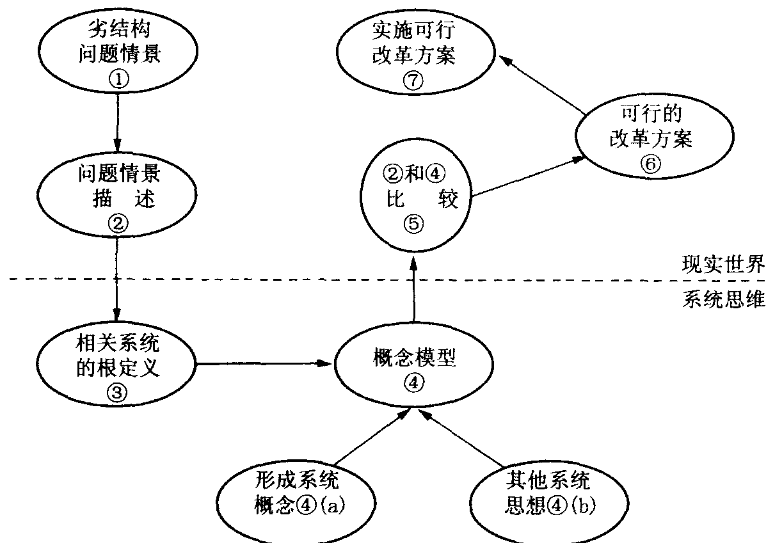


图 4　软系统方法论解决问题的步骤

骤研究解决。

图 4 是软系统方法论的示意。遗憾的是，Checkland 所说的步骤太“软”了，几乎没有什么规范。步骤⑤到⑥仅仅一步之隔，似乎轻飘飘就能跨越，过于简略，缺乏可操作性，不如 Hall。

3. H－Ch 方法论

笔者认为：可以把 Hall 方法论与 Checkland 方法论的一些内容综合起来，形成一种新的方法论，不妨称之为 H－Ch 方法论。Hall 方法论之“硬”，主要体现在时间维而不是逻辑维，逻辑维具有普遍适用性。只要改革时间维，就可以扩大 Hall 方法论的适用范围

不妨把 Hall 时间维所说的 7 个阶段代之以比较一般化的第一阶段、第二阶段、第三阶段、……，如果所研究的问题是“硬系统”的问题，那么，时间维仍然是 Hall 说的 7 个阶段；如果所研究的问题是“软系统”的“劣结构问题”，那么，第一阶段可以是“从议题中找出问题”，把该阶段按照逻辑维展开，也可以是 7 个步骤：摆出议题，确定（议论的）规则，系统综合，系统分析，系统评价，达成共识，确定（需要研究的）问题；然后，转入第二阶段，大体上就是 Hall 逻辑维说的 7 个步骤了。对于社会经济系统，第二阶段可以是对问题的“初步研究”，第三阶段可以是“深入研究”，第四阶段可以是经过甲乙双方对话以后的“修正研究”或者“补充研究”、“改进研究”等。第三维仍然称之为“专业维”，它的刻度可以是 Hall 的，也可以是钱学森院士的，也可以根据当前的最新进展重新设计。

这样，Hall 提出“神羊角模型”和“超细结构”仍然具有形象化的意义。

三、系统工程方法论评述

1. 钱学森综合集成方法论

1990 年，钱学森院士发表《一个研究的新领域——开放的复杂巨系统及其方法论》[8]。根据他从 80 年代中期开始亲自倡导和参加的系统学讨论班的研究，逐渐形成了综合集成方法论，包含“从定性到定量综合集成方法”和“从定性到定量综合集成研讨厅体系”简称“综合集成研讨厅体系”（Hall for Work Shop of Meta－synthetic Engineering，HWSME）[9,10]。他明确提出，综合集成方法论是处理开放的复杂巨系统的方法论，其核心是“从定性到定量综合集成”；作为一门技术，可称为综合集成技术；作为一门工程，可称为综合集成工程。综合集成对应的英文术语是 meta-synthesis，它高于西方学者在统计研究中提出的 meta-analysis。古语云“集大成，出智慧”，综合集成法是“大成智慧工程”的方法论。

钱学森院士指出:"关于开放的复杂巨系统,由于其开放性和复杂性,我们不能用还原论的办法来处理它,不能像经典统计物理以及由此派生的处理开放的简单巨系统的方法那样来处理,我们必须用依靠宏观观察,只求解决一定时期的发展变化的方法。所以任何一次解答都不可能是一劳永逸的,它只能管一定的时期。过一段时间,宏观情况变了,巨系统成员本身也会有其变化,具体的计算参数及其相互关系都会有了变化。因此对开放的复杂巨系统,只能作比较短期的预测计算,过了一定时期,要根据新的宏观观察,对方法作新的调整。"

综合集成法既体现了"精密科学"从定性判断到精密论证的特点,也体现了以形象思维为主的经验判断到以逻辑思维为主的精密定量论证过程。所以,这个方法是走精密科学之路的方法论。它的理论基础是思维科学,方法基础是系统科学与数学,技术基础是以计算机为主的信息技术,哲学基础是实践论和认识论。

综合集成方法论是从整体上研究和解决问题,采取人机结合、以人为主的思维方法和研究方式,对不同层次、不同领域的信息和知识进行综合集成,达到对整体的定量认识。运用这个方法论研究问题时,也需要进行系统分解,在系统总体指导下进行分解,在分解后研究的基础上,再综合集成到整体,实现一加一大于二的涌现,达到从整体上严密解决问题的目的。运用综合集成方法论的集体称为"总体设计部"(department of integrative system design)。钱学森院士多次呼吁成立国家社会主义建设总体设计部,运用综合集成方法论,对社会主义建设的长远问题进行科学规划和预测。总体设计部目前基本上是空缺,某些政府部门或者研究机构只是初具总体设计部的雏形。

综合集成方法论是钱学森院士的贡献,也是中国人对于系统工程国际学术界的贡献。我们应该充分重视钱学森综合集成方法论。钱学森院士提出了一个杰出的框架,我们应该充实之、完善之。许多学者对综合集成方法论开展了演绎和深化研究。笔者也作过一些研究,概述如下(参见图5):

如果单独看综合(synthesis)与集成(integration),则综合高于集成。集成比较注重物理意义上的集中和小型化、微型化,主要反映量变(例如集成电路);综合的含义更广、更深,反映质变,例如人们经常说"综合即创造"(也可以说"综合即创新")。综合集成的重点是综合。

综合集成对应的英文术语meta-synthesis(不是有些人望文生义杜撰的synthesis-integration,也不是meta-integration),其前缀meta-的含义是"在……之上","在……之外",这里当取"在……之上",那么,meta-synthesis就是"在综合之上"、"超越综合"。就是说,综合集成的重点在综合,目的是创造、创新。

综合集成(Meta-Synthesis)是在各种集成(观念的集成,人员的集成,技术的集成,管理方法的集成等)之上的高度综合(super-synthesis),又是在各种综合(含复合,覆盖,组合,联合,合成,合并,兼并,包容,结合,融合等)之上的高度集成(super-

integrate)；

综合集成考虑问题的视野是“系统之上的系统”(the meta-system，the system of some systems)：包含本系统而比本系统更大的系统(the bigger system)。

综合集成的反义是“单打一”、“拆散”、“零乱”，等等。在方法论上，综合集成是与还原论相对应、相对立，又相补充的，即所谓“相反相成”、对立统一。还原论仍然有它的用处，它会继续长期存在，但是，光有还原论是不够用了；综合集成也需要运用还原论得到的研究成果，两者应该结合起来，相互取长补短。

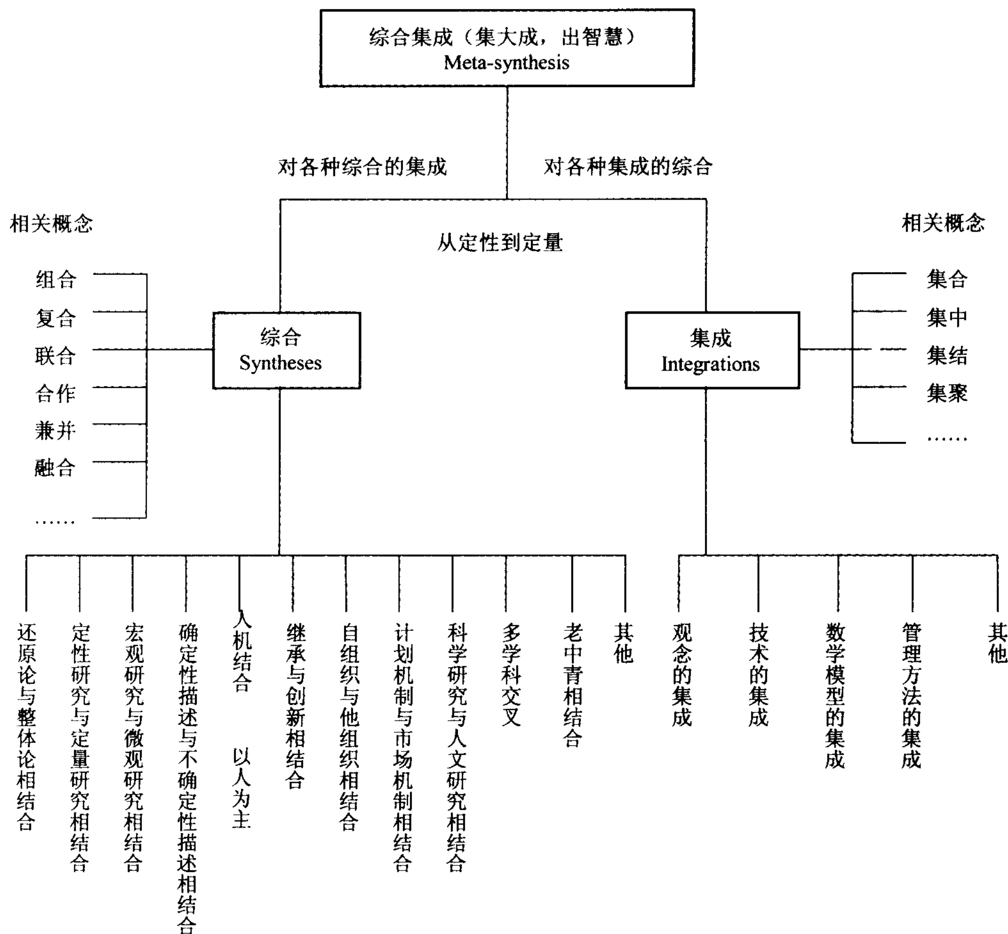


图 5 综合集成概念图解

2. 物理—事理—人理(WSR)系统方法论

中国系统工程学会前任理事长、国际系统联合会现任主席顾基发研究员和在英

国工作的中国学者朱志昌博士1994年提出了物理—事理—人理(Wuli—Shili—Renli,WSR)系统方法论[11],得到了国际的承认。WSR系统方法论是具有东方传统特色的系统方法论。

作为科学研究对象的客观世界是由物和事两方面组成的。“物”是指独立于人的意志而存在的物质客体。“事”是指人们变革自然和社会的各种有目的的活动,包括自然物采集、加工、改造,人与人的交往、合作、竞争,对人的活动所做的组织、管理等。通俗地讲,“事”就是人们做事情、做工作、处理事务。

运筹学促使科学认识从物理进到事理,事理学的研究又促使科学认识从事理进到人理。没有人的系统(自然系统)的运动总可以用“物理”加以说明,而有人的系统(社会系统)则要加上“事理”、“人理”去说明。

“物理”主要涉及物质运动的规律,通常要用到自然科学知识,回答有关的“物”是什么,能够做什么,它需要的是真实性。“事理”是做事的道理,主要解决如何安排、运用这些物,通常用到管理科学方面的知识,回答可以怎样去做。“人理”是做人的道理,主要回答应当如何做。处理任何事和物都离不开人去做,以及由人来判断这些事和物是否得当,并且协调各种各样的人际关系,通常要运用人文和社会学科的知识。处理各种社会问题,人理常常是主要内容。

WRS系统方法论认为,任何社会系统不但是由物、事、人所构成,而且它们三者之间是动态的交互的过程(dynamic interactions)。因此,物理、事理、人理三要素之间不可分割,它们共同构成了我们关于世界的知识,包括是什么?为什么?怎么做?谁去做?所有的要素都是不可或缺的,如果缺少了、忽略了某个要素,对系统的研究将是不完整的。

WRS系统方法论认为,在处理复杂问题时,既要考虑对象系统的物的方面(物理),又要考虑如何更好使用这些物的方面,即事的方面(事理),还要考虑由于认识问题、处理问题、实施管理与决策都离不开的人的方面(人理)。把这三方面结合起来,利用人的理性思维的逻辑性和形象思维的综合性与创造性,去组织实践活动,以产生最大的效益和效率。

一个好的领导者或管理者应该懂物理,明事理,通人理,才能把领导工作和管理工作做好。或者说,只有这样,系统工程工作者才能把系统工程项目搞好。

现在的关键是:人理如何度量?如何操作?尚有待于研究。

3. 其他表述

1986年全国软科学会议上提到了一个术语“斡件”(orgware)。它泛指除了硬件、软件之外,为沟通思想、协调关系、建立信任感而进行的各种工作。斡件属于公共关系学研究的对象。有人认为:在软科学的课题研究中,斡件占50%,软件占30%,硬件只占20%;开展系统工程项目少了斡件是不行的。必须把斡件与不正之

风、庸俗关系学区分开来，尽管在实际工作中往往难以区分。外国人似乎也注意到这个情况，居然在英语单词 relation 之外，出现了一个新词 guanxi，也算是国际与中国“接轨”吧。

著名系统工程学者上海交通大学吴健中教授在 80 年代中期指出：在任何层次上的研究，系统工程要用四维坐标系来考虑问题——空间的全局性，时间的长远性，事间的协调性，人间的群体性(处理好人际关系)。

这里说的硬件、软件和斡件，空间、时间、事间和人间，与物理、事理和人理有异曲同工之妙，尽管三组术语之间并不是严格的一一对应关系。

笔者认为，这三者都是钱学森综合集成方法论的一种特定的表述。它从不同的角度、不同的侧面多方面的综合集成。

四、方法论系统工程

系统工程在中国的发展可谓是“得天独厚”。20 多年来，系统工程在中国的发展得到了两方面持续不断的大力推动。一方面是以钱学森院士为代表的学术界，另一方面是从中央到地方的各级领导人。这在我国几百个学科中恐怕是独一无二的。

系统工程受到了历任党和国家领导人的高度重视。下面我们看现任中央领导人最近几年的一些重要论述。胡锦涛同志在 2004 年 6 月 2 日中国科学院暨中国工程院院士大会上说[12]：“落实科学发展观，是一项系统工程，不仅涉及经济社会发展的方方面面，而且涉及经济活动、社会活动和自然界的复杂关系，涉及人与经济社会环境、自然环境的相互作用。这就需要我们采用系统科学的方法来分析、解决问题，从多因素、多层次、多方面入手研究经济社会发展和社会形态、自然形态的大系统。”2005 年 2 月 19 日在省部级主要领导干部提高构建和谐社会能力专题研讨班上说：“构建社会主义和谐社会，是一项艰巨复杂的系统工程，需要全党全社会长期坚持不懈地努力。各级党委和政府要增强使命感和责任感，加强和改善对构建社会主义和谐社会各项工作的领导。”

温家宝总理 2003 年 4 月 13 日在国务院工作会议上说：“非典型肺炎防治工作是一项复杂的社会系统工程。各部门、各地区和各有关方面，一定要有全局观念、大局意识，在党中央、国务院统一领导下，协同配合，共同努力，全国上下拧成一股绳。中央各部门要各司其职，各负其责。”2004 年 7 月 5 日在全国依法行政工作电视电话会议上说：“建设法治政府，是一项事关国家全局和长远发展的系统工程。”

胡锦涛同志等中央领导人把神舟五号、神舟六号成功发射都称赞为系统工程；把中央的许多重大举措例如西部大开发、振兴东北老工业基地、提高党的执政能力等，都作为系统工程看待。

中共中央 2001 年 9 月 21 日颁发的《公民道德建设实施纲要》第七章第 33 条：

公民道德建设是一个复杂的社会系统工程，要靠教育，也要靠法律、政策和规章制度。必须综合运用各种手段，把提倡与反对、引导与约束结合起来，通过严格科学的管理，培养文明行为，抵制消极现象，促进扶正祛邪、扬善惩恶社会风气的形成、巩固和发展。

去年年底，中央提出建设社会主义新农村的重大任务。今年2月13日，人民日报发表文章《我国现代化进程中的重大历史任务——论扎实推进社会主义新农村建设》(作者　韩俊)，文中指出："新农村建设是一个庞大的系统工程，涵盖了经济建设、政治建设、文化建设和社会建设。"建设社会主义新农村，这是今年中央两会的核心内容之一。建设社会主义新农村，这是"十一五"时期和今后15年内党和国家的工作重点之一。

各地区、各部门的领导人，把他们遇到的重大问题，尤其是复杂的、难以一下子妥善解决的问题，往往称之为"这是一个系统工程(问题)"。可以说，各行各业呼唤系统工程，全国呼唤系统工程，甚至全民呼唤系统工程。这种现象应该如何看待？有褒有贬，说法不一。

笔者认为：这是一种可喜的现象，应该以积极的态度欢迎之！首先，这种现象说明大家对于系统工程寄予殷切的期望，期待系统工程能够用来解决他们在工作中遇到的难题——实际上都属于组织管理工作中的问题(在这里，组织管理工作的含义是比较广泛的，包括：组织，计划，指挥，协调，控制，决策，领导，把握全局，等等)；其次，系统工程有能力解决这些问题，关键是要把这些问题作为系统工程应用研究项目，组织项目组扎扎实实开展研究，提出比较妥善、比较圆满的解决方案；第三，在不断地研究和求解难题的过程中，系统工程的理论与方法也将不断发展和完善。

这里，重要的是"其次"，即确立研究项目，组织项目组，开展扎扎实实的研究工作。只要作为系统工程应用研究项目去开展研究，就没有解决不了的问题或难题，因为，"办法总比困难多"。但是，如果不认真研究求解，只是贴一个"系统工程"的标签，问题是不会自动解决的，反而会对系统工程的声誉产生负面影响。

笔者还认为：这种局面意味着**系统工程术语已经成为一个代名词——代表一种普遍适用的科学方法论——称之为"方法论系统工程"**，即"作为方法论来看待和运用的系统工程"。这种方法论的要点是：用系统的观点来考虑问题(尤其是复杂系统和复杂大系统、巨系统的问题)，用工程的方法来研究和求解问题。这里所说的"工程的方法"，不仅仅是传统的工程方法，而且包含各种新型的工程方法——系统工程就是一大类新的工程技术和方法；这里所说的"工程的方法"，其核心是从定性到定量的综合集成。

方法论系统工程的要点有：统筹兼顾，合理安排；化解矛盾，协调关系；提高效率，提高效益；追求优化，追求和谐。还可以概括为文献[13]所说的"一个系统，两个最优"，即：把所研究的对象看作系统(在适当的条件下)，不但要求实现的目标是系

统总体最优，而且要求实现目标的方法或途径也是最优的。“最优”是理想化的，实际上常常只能是“次优”或“满意”，是“优化”，所以，不妨概括为“一个系统，两个优化”。

方法论系统工程是方法与技术层次上的系统工程的升华。我们对照图 6 所示的钱学森院士提出的系统科学体系可知：方法论系统工程已经超越了作为基础科学的系统学，包容了作为过渡桥梁的系统观，连接到马克思主义哲学。

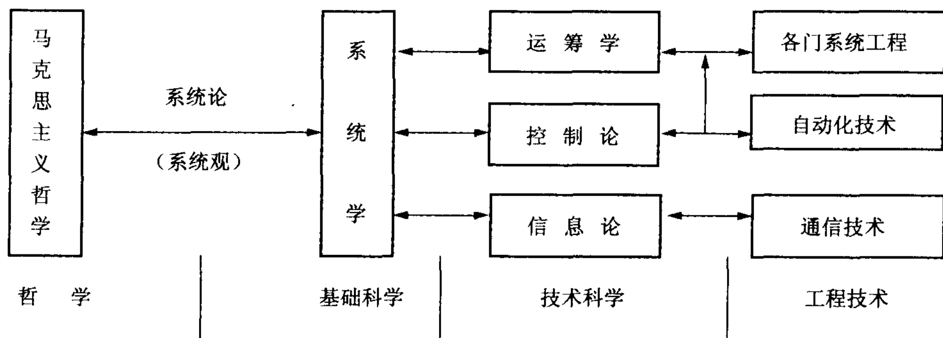


图 6　系统科学体系结构

文献[14]注意到一个事实：在钱学森院士提出的现代科学技术体系中，包含了 11 个大的科学技术部门，这个体系具有全面的包容性，但是，其中却没有管理科学，这是为什么？该文认为：钱学森院士没有单独列出管理科学的原因在于，他把管理科学纳入了系统科学部门；既然说“组织管理的技术——系统工程”，那么，合理的推论应该是“组织管理的科学——系统科学”；按照这个推论，可以说：系统科学即管理科学（广义的管理科学），管理科学包含于系统科学。这个观点可能会有异议，但是有利于宣传与推广方法论系统工程。

应该致力于完善方法论系统工程，使它比较准确而又通俗易懂，能够普遍推广应用，让各行各业广大的干部和群众都能理解、掌握和运用。

参考文献

[1] 钱学森，许国志，王寿云：组织管理的技术——系统工程，《文汇报》，1978 年 9 月 27 日，第 1 版。收录于钱学森等著：《论系统工程（增订本）》，湖南科学技术出版社，1988 年 10 月第 2 版

[2] 钱学森，王寿云：系统思想和系统工程。这是钱学森院士 1980 年在中央电视台系统工程讲座的讲稿，原载中国科协普及部《系统工程普及讲座汇编（上）》。

[3] 孙东川，林福永：《系统工程引论》，清华大学出版社，2004 年 10 月第 1 版，本文关于系统工程的一些基本观点和引述，凡未注明出处者，均出于此书。

[4] 孙东川:Hall 模型与系统工程专业,《系统工程》1985 年(1)
[5] 钱学森:大力发展系统工程 尽早建立系统科学的体系,1979 年 10 月在北京系统工程学术讨论会上的讲演,1979 年 11 月 10 日《光明日报》
[6] Hall A. D.: Three-Dimensional Morphology of Systems Engineering. *IEEE Trans. Syst. Sci. Cyber.*, 1969, SSC−5(4):156−160. In: Sage A. P. (*Edited*): *Systems Engineering: Methodology and Applications*. IEEE PRESS
[7] Checkland, P. B., The Origins and Nature of Hard Systems Thinking, in: *J. of Applied System Analysis*, 5, 1978
[8] 钱学森,于景元,戴汝为:一个科学新领域——开放的复杂巨系统,《自然杂志》1990(1)
[9] 王寿云,于景元,戴汝为,汪成为,钱学敏,涂元季:《开放的复杂巨系统》,浙江科学技术出版社,1996 年
[10] 姚诗煌,江世亮:以人为主发展大成智慧工程,《文汇报》2001 年 3 月 20 日第 1 版
[11] 顾基发:物理−事理−人理(WSR)系统方法论,许国志主编:《系统科学与工程研究》,上海科技教育出版社,2000 年
[12] 胡锦涛在中国科学院暨中国工程院院士大会上的讲话,《人民日报》,2004 年 6 月 3 日。本文引用的领导人的其他言论,均可以在人民网上找到
[13] 孙东川,陆明生:《系统工程简明教程》,湖南科学技术出版社,1987 年
[14] 孙东川:谈谈管理科学与系统工程,发表于 2002 年 5 月南京大学 90 周年校庆之际召开的"中国著名大学管理科学与工程领域科学家峰会",载于会议论文集。
[15] 以上[1][2][5]均收录于钱学森等著:《论系统工程(增订本)》,湖南科学技术出版社,1988 年
[16] 以上[8][10]均收录于钱学森著:《创建系统学》,山西科学技术出版社,2001 年
[17] 以上[4]收录于孙东川等著:《系统工程与管理科学研究》,暨南大学出版社,2004 年

支持自主创新的知识管理战略研究*

汪应洛

西安交通大学管理学院，西安，710049

企业惯用的“重产品引进，轻消化吸收”、“重模仿创新、合作创新，轻自主创新”的创新模式导致企业自主创新能力薄弱，缺乏拥有自主知识产权的技术和产品，产业技术甚至出现了“空心化”的危险；具体表现在以下方面：具有自主知识产权的关键性技术供给和技术储备严重不足，产业结构调整和产业升级举步维艰；产业技术状况与国际技术比较并不乐观及我国产业发展存在对国际技术装备的较高依赖[1]；我国关键技术的自给率较低，对外技术依存度达50%以上，而发达国家均在30%以下，美国和日本则在5%左右；在我国的设备投资中，进口设备占投资设备购置总额的比重达60%以上，一些高技术含量的关键设备基本上依靠进口；我国每年的发明专利数占世界的比重不到3%。可见，企业惯用的创新模式已不能适应新型工业化的发展要求。新型工业化对企业自主创新能力提出了要求，其实质就是用科技进步推动经济增长方式发生根本的转变。自主创新是依赖本地有限的科技资源对一些产品的核心部件进行自主开发、并产生拥有自主知识产权品牌产品的创新。但自主创新并不排斥引进、消化与吸收，相反，自主创新是在引进、消化、吸收的基础上通过多种途径产生具有自主知识产权的工艺、产品等的创新过程。自主创新对于一个国家和区域的经济社会结构调整与持续竞争力的培育有着极为深远的影响，我国为了转变增长方式、增强国际竞争力，提出了加强自主创新的重大战略[2]。

一、知识管理与自主创新

所谓“自主创新”，是指通过提高科技原始性创新能力、集成创新能力和引进消化吸收能力，因而拥有一批自主知识产权，进而提高国家竞争力的一种创新活动。其要点有三：一是使制度、机制和资源配置更有利于原始性创新，使之涌现出更多的科学发现和技术发明；二是加强集成创新，使相关科技成果有机融合，形成具有市场竞争力的产品和产业；三是在引进消化吸收国外先进技术的基础上进行二次创新。

* 本文受教育部博士点基金(网络组织的知识管理研究)资助

自主创新能力提升的基础是其创新所依赖的主体具备能创造新知识能力。联合国著名的千年计划"科学、技术和创新"项目组于2005年发表了《创新——知识促进发展》的报告，强调了知识和创新对于每个国家发展的极端重要性。传统观念认为，只有处在一个收入水平范围内的国家，才能分享同样的政策战略；这份报告却建议政策制订者们从全球知识和发展经验的大潮中汲取营养，避免人为地把国家分门别类，从而限制了知识吸收和政策学习的范围。报告指出，为了应对在经济生产率、农业、教育、男女平等、健康、饮用水、卫生、环境等领域的挑战和参与全球经济，知识的创造、传播、扩散、积累和应用必须加强。必须把创新和知识发展作为企业发展战略的中心。发达国家和新型工业化国家迈向创新型国家的成功经验表明，打造创新型国家应该有健全的知识创新体系、知识扩散体系、知识技术服务体系及知识经济发展战略。如韩国早在2000年就制订了知识经济发展规划并举办了六次世界知识论坛及评选亚洲最佳知识型企业，韩国的知识经济战略和知识服务/创意产业及工业设计规划为韩国进入创新型国家作出了巨大贡献。

知识管理理念提出以后，在最近10年里理论上取得了一定突破，成为企业、产业与国家获得竞争力及提升其创新能力的重要工具。Bill Gates认为知识管理就是提供一套系统性的程序与方法，引导企业组织成员得以有效率的将企业重要的信息与知识加以发布、组织、收集、传送、搜寻，并进行分析与管理[3]。Davenport认为知识管理简单地说就是管理企业中的知识，因为企业中的知识分散于各地、各部门、各事业单位，所以，在日益竞争的环境下，管理企业中的知识对组织而言就格外重要；知识管理即透过所见、所知和萃取信息的过程来了解事物，并将信息转为知识的一个过程，这个过程包括取得知识（knowledge acquisition）、表现知识（knowledge representation）及寻找知识（knowledge finding）[4]。Wiig曾对知识管理下一个较完整的定义：为一串协助组织获取自己及他人知识的活动，通过审慎判断之过程，来实现组织任务。此类知识管理活动，需架构于科学技术、组织架构及认知过程，以培育完整知识领域及创造新知。此认知过程除需相互学习、解决问题及决策外，还需结合组织、人、计算机系统及网络，以获取、储存及使用知识。如何能使知识管理朝向非线性及更一致化方式协助决策，并提供组织处理危机之能力，更重要的是应用知识以提高信息技术处理能力，来提升创造知识的能力[5]。IBM认为知识管理是企业know－how管理及共享运用；目的在全面提升生产力（productivity）、应变力（responsiveness）、工作职能（competency）以及创造力（innovation）。通过知识管理可以实现增加组织整体知识的存量与价值，应用知识以提升技术、产品、服务创新的绩效以及组织整体对外的竞争力；促进组织内部的知识流通，以提升成员获取知识的效率；指导组织知识创新的方向；协助组织发展核心技术能力；有效发挥组织内个体成员的知识能力与开发潜能。对企业知识活动——知识的获取、知识的选择、知识的内化与知识的外化的有效管理可以提升企业的自主创新能力。从企业的角度来

看，知识管理在自主创新能力形成的作用机制可以借助图 1 来进行描述，具体体现为以下几方面。

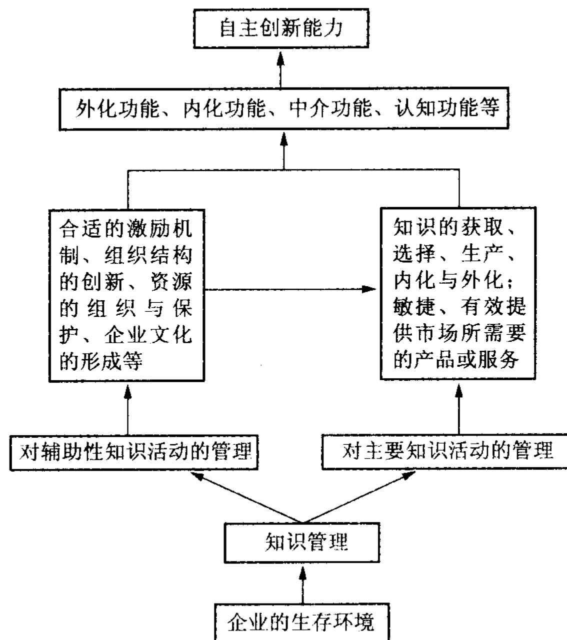


图 1　知识管理与自主创新能力的形成

其一，外化功能——对知识获取的管理功能。外化功能是指以外部存储库的形式捕获知识，并根据分类框架或标准来组织它们。其主要所依赖的工具包括搜索工具、数据库管理系统、文件管理系统等。其中，搜索工具用于在诸如 Internet 或其他信息资源上搜索并下载知识；数据库管理系统和文件管理系统用于对所收集到的知识进行分类、储存及相应处理。外化的结果是使具有相似特征的知识聚集在一起，它的作用最终体现在通过内化或中介使知识寻求者能够得到自主创新所捕获到的知识。对于一个企业来说，这里的知识既包括存在于企业内部员工头脑中的未编码知识，也包括存在于数据库中的已编码知识。通过这一环节，可以使知识有效集中。集中了的知识对于从事研究与开发的创新人员来说，无异于一个激发创造灵感的知识宝库。

其二，内化功能——对知识处理的管理功能。内化功能是指设法发现与特定用户需求相关的知识。内化建立在外化的基础上，是对外化结果的深加工。它从外部储存库中挖掘知识，并通过筛选来发现与知识寻求者相关的知识，并以最合适的方式进行重新分类、重新储存。管理的内化功能使知识的寻求者更方便地获取所需知识，大大提高了知识获取的效率，有效缩短了知识生产与创新的周期，提高了创新对

市场的响应性与及时性。

其三,中介功能——对知识传递的管理功能。中介功能是指将知识寻求者与最佳知识源相匹配。这是知识发挥作用的关键性步骤及前提条件。储存于数据库中的静态知识是不能发挥作用的,只有将它与特定的人、特定的过程进行动态匹配,才能实现其蕴含的价值,实现价值增值;而自主创新需要知识传递来实现创新成果的传播,让企业内成员认识、掌握与应用创新成果。

其四,认知功能——对知识运用的管理功能。认知功能是指对经由前三个功能交换得出的知识的运用,是知识管理的终极目标。具体包括两个方面的内容,一是利用所提供的知识形成决策方案指导企业的生产经营活动;二是在提供的知识基础之上,进行知识创新,即通过科学研究,包括基础研究和应用研究,获得新的基础科学和应用科学知识,是一个追求新发现、探索新规律、创立新学说、创造新方法、积累新知识的过程。这一知识应用直接影响着自主创新成果能否应用于市场竞争,并在竞争中培育企业的核心竞争力的关键。

二、支持自主创新的知识管理战略

Davenport 和 Prusak 认为知识创造是公司为了增加知识库存,所采取的特定行动与计划;认为其目的在于增加知识库存。Nonaka 提出五种适合组织创造知识的条件,分别是意图(intention)、自主权(autonomy)、波动/创造性浑沌(fluctuation/chaos)、重复(redundancy)、必备的多样才能(requisite variety)[6]。组织欲进行持续的知识创造,则需具备一些特质,组织透过这些不断重复的行为特质,才能期待新知的如泉涌现;其组织应具备的特质如下:对知识的热忱,也就是对组织每项活动的知识内涵感到兴趣,同时经理人更要重视并鼓励知识的累积;在知识上领先的企图心,也就是在某个行业中保持知识高人一等、领先群伦,当竞争上有必要时它有进入市场的能力;紧密结合互补技能,组织需要拥有 T 型技巧和 A 型技巧的人来横向管理组织各个接口,也就是组织知识库本质需转变为具有高度的联结性,以联结组织各个部门、层级不同特质的员工;熟能生巧,了解持续重复所有活动的重要性;培养"向前失败"的能力(虽然向后退一步,却又向前走两步),而原型的"尝试和学习"的态度可防止核心僵化的产生;更高层次的学习;善于倾听和学习的领导人。创造知识的方法主要包括达文波特提到的收购、融合、适应以及知识网络等:收购提供了获得某个组织知识的方法,此种方法的好处不仅是获取知识,若是组织要扩充生产线、多角化经营这都是最方便、快速的方法;但是收购的方式依然可能造成知识的流失,或对组织造成影响。融合为组织特意建立复杂与冲突的环境,使组织在混乱、冲撞的情境之下创造出新的工作模式,并在此模式下产生新知识。适应是指组织为了适应环境的变化,而努力适应环境并追求进步,使得环境变化的威胁成为知识创造的媒介。

知识网络为组织内非正式的群体构成；由共同志趣的人员组成团队，并在频繁的对话中创造新知。

我国的技术应用体系和科学界的知识创新体系相对较强，而我国的知识扩散体系、知识技术服务体系以及产业界的知识创新体系与发达国家和地区相比差距较大；正是因为这种支持自主创新成果的共享与扩散机制与系统的不完善，使得我们许多在实践中和理论研究中已经取得明显创新性的成果没有得到广泛的应用。基于这一现实，要加快培育我国的自主创新能力需要实现从国家整体、区域、产业及企业等四个层面上实现知识的共享与扩散；企业是创新的主体，为实现整体自主创新能力的提升，从企业出发来加强其知识管理，尤其是实现知识在企业与企业间、企业与科研单位等组织之间的共享与扩散是其关键，通过加强企业间的知识共享从而形成行业、区域内的知识共享、传播渠道，进而推动国家整体创新能力的提升。从企业这一创新的原始主体来看，为了提升其自主创新能力，有必要从以下几方面加强。

（一）建立知识库

包括达文波特在内的知识管理专家认为隐性知识是企业的核心优势的重要来源，同时诸多的知识管理专家均认为从转移的角度来看，隐性知识是难于转移的知识，如 Lahti 和 Beyerlein 认为适当的知识转移，要考虑到知识的种类(内隐或外显)，较内隐或可编码的知识在组织里往往比较在组织外容易转移[7]。隐性知识的转移是基于知识主体的交流、潜移默化等方式来实现的；可以借助于图 2 来反映知识编码的程度与知识转移的方式选择的关系。从图 2 可以看到，知识的编码程度越低则知识转移则对知识的发送方与知识的接受者之间交流的方式要求越高；相反，如果是编码程度很高的显性知识则知识转移的双方只需要借助数学的形式即可以实现知识的转移。正是因为存在知识编码与知识转移方式之间存在的关联特性，使得在实践中和理论研究中所存在的创新成果不能得以广泛的推广与应用；编码化的前提是在知识团队内建立知识编码化的科技基础结构(IT infrastructure)，即利用信息技术建立资料库、计算机网络、数据库等对创新行为中所形成的知识编码化，即建立知识库。

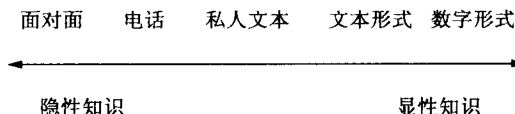


图 2 知识转移方式与知识的编码程度

如 Drucker 所言知识的创新乃由多种不同领域的知识汇聚而成，非仅以单独一门知识为基础；创新的条件之一是牵引不同的体系，创造出因互动而交织的新知识。目前的知识发展大体呈现出多头马车的情况，但在混乱的情境中仍有一定

的秩序存在，这就像是系统动力学中，内在因素互相牵动与“熵”不断的加强，因而大幅提升彼此碰撞的机会，这样的碰撞正是创造能量的来源，知识也是如此。知识领域的多元化发展以及交互之间的冲突、摩擦，其实更有助于创新且有价值的知识产生。现在知识的运作模式，和过去相比较则大相径庭，呈现出交错复杂的情况，很多时候得要不同的专家互相合作，才能创造、开发出一套有用的知识技术；知识的交流、冲突、摩擦往往是事后行为，在产品、技术创新行为中由于行业内各单位各自为政，以自身的理解与知识储备来进行相应的创新。实现知识的交流，其前提就是在行业内建立知识库。根据 Danielr Tobin 的研究结果，知识库一般应该由以下的一些知识组成[8]：企业基本信息，企业组织结构信息，产品和服务的信息，基本流程的信息；关于专利、商标、版权，使用其他企业技术、方法许可证的信息；顾客信息。

从构建知识库的技术来看，主要包括有：基于信息技术的知识库——知识库管理系统，以及基于传统编码技术的知识库如图书的方式两种。基于信息技术所建立的知识库具有十分重要的意义：主要体现为以下几方面。①信息技术为处于不同区域的成员获取、搜索、学习、传播知识提供了可能，而基于传统技术的知识库很难满足这一需要。②信息技术为知识库内的相关知识的更新提供了技术支持，能实现新知识在第一时间内进入企业内的知识库，在管理有效的前提下，基于信息技术的知识库的知识更新与知识的生产可以是同步进行；而基于传统技术的知识库的知识更新的时间相对较长，而且成本较高不具有经济性与时间上的快捷性。③基于信息技术的知识库为隐性知识的传播提供了可能：通过音频技术与视频技术可以实现对拥有隐性知识的专家的相关的声音与身体语言的传播，而隐性知识的相当一部分是“只可意会，不可言传”，不能用文字来表达但可以通过身体语言来传播。④基于信息技术的知识库能实现对相关知识的快速搜索，降低了搜索知识的成本与时间。

（二）强化知识培训体系

为创造新知识需要接受有关创意专业技术训练的最高层人力资源；而运用新知识则需要具有优质技术与受过教育的中、低阶层人力；个人及组织的创造力易受其背景、训练与个人解决问题的方式而有所不同。为促进新知识的创造与应用，在行业需要建立完整知识培训体系。首先要明白知识传播在组织内传播的过程。知识的培训对实现知识的市场价值具有十分重要的意义。其原因具体可以表现为以下几方面：首先在新知识生产出来以后，新知识要转化为产品有赖于知识在组织内各部分之间的传播；其次，知识尤其是新知识的使用使得产品中的知识含量提高，而知识含量的提高使得产品的使用者对新产品的使用存在知识上的障碍——知识存量的有限、学习知识存在成本（时间与精力上的成本），如果产品中的知识含量相较于

过去的产品提高程度十分明显、消费者存在的知识障碍使其不能掌握产品的使用方法从而其潜在的需求不能转化为现实的需求，其知识不能顺利地实现其市场价值；再次，知识要实现其规模报酬的递增、路径依赖与锁定效应，其关键是新知识占领市场的速度与范围，而其关键是让企业的供应商与销售商掌握新知识、让新知识成为供应链内的知识标准：从供应链的角度来看，供应链中成员间的关系往往是产品的供需关系，供应商拥有其所提供的产品全部的有关诸如性能、制造与使用等方面的知识，但不拥有制造商对该产品在使用过程中存在的缺点、要在哪些方面改进等方面的知识，相应地制造商并不能很完备地拥有供应商所提供产品尤其是专用设备的使用与维修方面的知识，在现阶段来看一旦设备出现问题往往是由供应商提供专业人员来维修，这无疑增加了最终产品的成本；从这一点来看，建立有效的培训体系，有利于降低成本及提高知识创新的针对性。

（三）建立交流平台

交流对知识创新有十分重要的作用：Leonard－Barton 的创造性摩擦（creative abrasion）理论认为成员在互动中，因为彼此的理念、价值观、领域知识的不同，在工作或者会议的过程中容易产生言语、想法的碰撞，这些碰撞正是创新的来源，也是创造新知识的方式；Nonaka& Takeuchi 创造性浑沌（creative chaos）理论认为组织在环境中形成不安定的气氛，因不安定而产生波动，组织成员在此波动的环境中较易于创造新知。为了建立行业内的交流平台，具体可以包括以下几部分：首先建立策略社群，Stored& Hill 认为透过策略社群的组织运作，成员间的异质性，将能激发彼此脑中的智能，创造力将层出不穷。策略社群便是借着成员间的高度互动与共识，在工作中学习新经验并与其他成员分享心得，经由一次又一次的经验累积以及个人到团体、组织的持续学习增加组织整体竞争力，并达成策略目标。其次，在行业内培养开放的气氛，促进知识在组织内的交流，具体包括信息的可亲近性、分享错误及问题、冲突观点的接受等方面的内容。再次，要利用信息技术建立交流的技术平台，知识管理的技术、工具等为知识交流的平台的建立提供了条件；Compaq 公司在实施知识管理时，将整个路径分为四大阶段即知识收集、知识共享、知识利用以及知识拓展，在每个阶段都有相应支撑技术，Compaq 所总结的各个阶段的关键技术为：收集阶段包括 intranet、数据仓库、信息仓库及数据挖掘等技术，共享阶段包括消息传递、工作流与文档管理等，利用阶段包括门户、知识地图、专家定位、搜索引擎与分析代理等，拓展阶段包括 extranet、商业智能、背景分析与智能代理等[9]。从技术的角度来看，文档管理技术、数据挖掘技术、专家系统技术、搜索引擎技术、群件技术、BBS 技术等均能在一定程度为知识转移提供平台；将现有的知识管理技术中的包括分布式知识库、知识地图、知识管理系统、多代理知识系统、知识推理与表述等具有一定成熟度的技术应用有利于知识交流平台的建立。

（四）加强组织间的信任机制与企业内部的激励机制

如前所述，国家整体创新能力的提升需要的是知识在整个行业、区域乃至国家范围内进行交流与转移，实现组织学习：由于行业内或区域内各企业间存在合作关系的同时也存在竞争关系，因此许多有用知识的内隐本质，假如伙伴是想从另一方竞争性地学习，则对方出于自身利益的需要往往对以内隐形式的知识采取防御性的做法，如果双方或所有伙伴都采用此战术，他们可能会面临转换内隐的或偷偷被伙伴持有的知识，到对合作活动有用的知识会出现困难，这对实现合作联盟目标是不利的。当被一个伙伴成员所持有的内隐知识，是由另一个伙伴所买进的新知识所取代时，则会对先前团体认同产生威胁。正是因为上述因素的存在使得在行业内的知识交流与转移存在可能产生对内部化新知识的重要阻力。Szulanski 分析公司内最佳实务转移的困难中指出信任是四个关键性障碍之一，知识拥有者可能因害怕失去拥有权、优越感，或权益地位，而不愿与他人分享，也有可能是因为知识拥有者不愿花时间与他人分享，或者是分享知识并不会得到适当的报偿，知识转移者不被信赖[10]。Argote[11]认为组织里，跨单位或跨团队的知识转移可能会因为：单位或团队间的竞争导致知识转移缺乏信任基础：或如竞争关系，则其成员可能会没有与他人分享的动机，同时根据社会认同理论（social identity theory），个体往往给予自我正面的评价，并导致个体较喜欢自己所属的团队，而对其他团队标上负面的评价，若组织的绩效是依各群体相对表现来评估，则会制造各群体彼此间的竞争，因而影响与其他群体分享的动机。组织间的知识转移具有了跨单位或跨团队知识转移的特征，因而团队与团队之间的信任机制建立更具有一定的困难。相互信任就是一方有能力控制另一方，但它却愿意放弃这种能力而相信另一方会自觉地做出对己方有利的事情。相互信任是互惠互利的需要，更是组织间知识高效转移不可缺少的基础。利用组织间文化协同、参与人之间的经常性交流、利益关系人之间收益与责任的合理分配及契约安排建立包括过程型机制、特征型机制和规范型机制等形式信任机制对组织间知识交流与转移而言是十分必要的。

对于企业的知识活动效率的提高来源于以下因素的改善：知识工作者的自主性与创造性得到充分的发挥、知识在组织内及时向大范围的传播与共享等，要实现以上因素的改善，关键是企业要为知识工作者对企业的贡献包括显性的贡献与隐性的贡献进行激励，前者如开发了的新知识产权，后者则如知识工作者在其交流中对其他成员的帮助与启发等。对于涉及知识活动的行为主体的激励存在与其他业务活动的行为主体激励措施上明显的区别，具体体现为对知识活动的绩效的评价存在困难。知识活动的绩效的评价之所以存在困难其原因在于以下几点：知识活动存在很强的不确定性，知识工作者的绩效来源于两个至关重要的因素——知识工作者的努力程度与外部环境，在现实的工作中知识工作者可能十分的努力但由于外部的不确定性使得知识工作

者的成果不一定十分显著,与此相反的是,有些知识创新行为的成绩十分显著但并不是因为知识工作者的努力的结果,如何为知识工作者的努力程度提供一个公平的报酬体系是关键(根据激励的公平理论:工作者激励的是否有效取决于其对自己所得的报酬与所付出的劳动与其他成员所得的报酬与所付出的劳动的比较结果);从知识工作者的绩效本身来看,其绩效不易于度量:对于显性知识活动而言,其成果可以通过诸如所申请得到的专利数、发明的新产品的多少等来实现,对于知识工作者的隐性活动而言或者说主要是传播与共享其知识的活动而言,其绩效很难通过一个明确的定量的方法来评价。从知识工作者的行为动机来看:其创新性的动机较强,但其传播与共享知识的动机不强,其根本原因在于知识对于其拥有者而言,是其在企业中取得竞争优势的根本要素,一旦其将知识尤其是其所拥有的经验之类的隐性知识与其他成员共享,往往将威胁到其在企业中的原来所依赖的专业知识所建立起来的竞争优势,因此往往在激励机制不完善的条件下知识的共享与传播不能得到有效的实现。但知识的共享与传播对于企业的知识活动效率的提高是十分重要的,因此如何激励知识工作者是建立知识管理战略的重要内容之一。

参 考 文 献

[1] 王淼,胡本强,蒋宗峰:我国新型工业化进程中企业自主创新的模式与策略,《经济纵横》,2005年第10期,60—62

[2] 龙开元:自主创新的区域化战略思考[J].《科学学与科学技术管理》,2005(11):59—63

[3] Wiig, K. M. (1994): Knowledge management: The central management focus for intelligent-acting organizations. Ar-lington, TX: Schema Press

[4] Davenport, T. H., Ten Principles of Knowledge Management and FourCase Studies, Knowledge and Process Management, Vol. 4, pp. 187—208, 1997.

[5] Wiig, K. M. (1994). Knowledge management: The central management focus for intelligent-acting organizations. Ar-lington, TX: Schema Press

[6] Nonaka, I. & H. Takeuchi, (1995). The knowledge-creating company: How Japanese Companies Create the Dynamics of Innovation. Oxford University Press.

[7] Lahti, R. K. & Beyerlein, M. M. Knowledge transfer and management consulting: a look at the firm[J]. Business Horizon, 2000, 43(1), 65—74.

[8] Danielr. Tobin, Networking Your Knowledge, Management Review, April 1998.

[9] http://www.chinakm.com/

[10] Szulanski, G. The process of knowledge transfer: a diachronic analysis of stickiness[J]. Organizational Behavior and Human Decision Processes, 2000, 82(1), 9—27.

[11] Argote, L. & Ingram, P. Knowledge transfer: A basis for competitive advantage in firms [J], Organizational Behavior and Human Decision Processes, 2000, 82(1), 150—169.

TEI@I 方法论及其在外汇汇率预测中的应用 *

汪寿阳 [1]，余乐安 [1,2]，黎建强 [2]

1 中国科学院数学与系统科学研究院，北京，100080

2 香港城市大学商学院管理科学系，香港

一、引　　言

在复杂系统中，由于各种组成要素交互作用和外部因素的相互影响，复杂系统具有突现性和非线性等特征，使得传统的线性研究范式很难处理复杂系统的相关问题。基于此，众多学者被吸引投身于此领域的研究，从而形成了一个新的交叉性学科——复杂性科学，并涌现出了许多新的理论、方法和模型。

外汇市场乃至所有金融市场都是复杂演化的动态市场，是高噪声、非平稳、带有确定性混沌的系统[1]。这就意味着外汇市场是随时间非线性动态变化的，这表现在：不仅单个数据序列在均值和方差上是不平稳的，而且一个数据序列与其他数据序列的关系也是动态变化的。因此，对如此动态不平稳数据序列进行建模是一个非常有挑战性的任务。其中，外汇汇率预测被认为是现代时间序列预测中最富挑战性的应用之一[2]。

自上个世纪外汇市场建立以来，外汇汇率预测就成了一个被各国学者研究的热点问题。在这些预测中，线性的概率统计模型曾得到广泛的应用，如 ARIMA 模型、阈值自回归模型、多项式自回归模型、指数自回归模型等，后来还有灰色预测、混沌时间序列预测及神经网络等方法，其中神经网络最引人注目、并且使用非常广泛。然而，到目前为止，在所有的外汇汇率预测技术中，没有任何一种技术或方法能够在任何条件下一致地优于其他方法[3]。在神经网络预测外汇汇率文献中，一些研究指出神经网络优于其他方法，而另外一些研究却给出相反的结果。即使在同一个研究项目中，一些矛盾的结论也是存在的。例如，Hann 和 Steurer[4] 在 1996 年预测美元兑德国马克的文章中指出，如果使用周数据，神经网络预测效果优于货币模型和随机游走模型；如果使用月度数据，神经网络预测效果甚至不如简单的线性回归模型[4]。因此，任何依靠单一方法和模型的技术很难一致地预测外汇汇率并一致地取

* 本文获得国家自然科学基金委员会优秀创新群体基金（NFSC No. 70221001）、香港城市大学战略研究基金（SRG No. 7001677, 7001806）和中国科学院的资助。

得较好的预测效果。在这样的背景下，我们利用一个处理复杂系统的方法论——TEI@I 方法论[5]来研究外汇汇率预测问题。从 2002 年 10 月开始，我们每天在网上（http://madis 1. iss. ac. cn/forex/ cn/cndefault. htm? nowposition=1）发布 6 种外汇汇率的预测结果，与国外同类的工作相比，我们无论在预测精度还是在市场运动方向的预测准确性方面都处于领先水平。

二、TEI@I 方法论理论基础和基于 TEI@I 预测模型的理论框架

TEI@I 方法论是一种结合传统的统计技术与新兴的人工智能技术的一个方法论。它是基于“文本挖掘（Text mining）＋经济计量（Econometrics）＋智能技术（Intelligence）@集成技术（Integration）”而形成的。这里用“@”而不用“＋”，主要目的在于强调是一种非叠加性的集成，强调集成的中心作用[6]。在这个方法论中，系统地融合了文本挖掘技术、经济计量模型、人工智能技术及系统集成技术。在复杂系统的分析与研究中，TEI@I 方法论是基于一种“先分解后集成”的思想，首先将

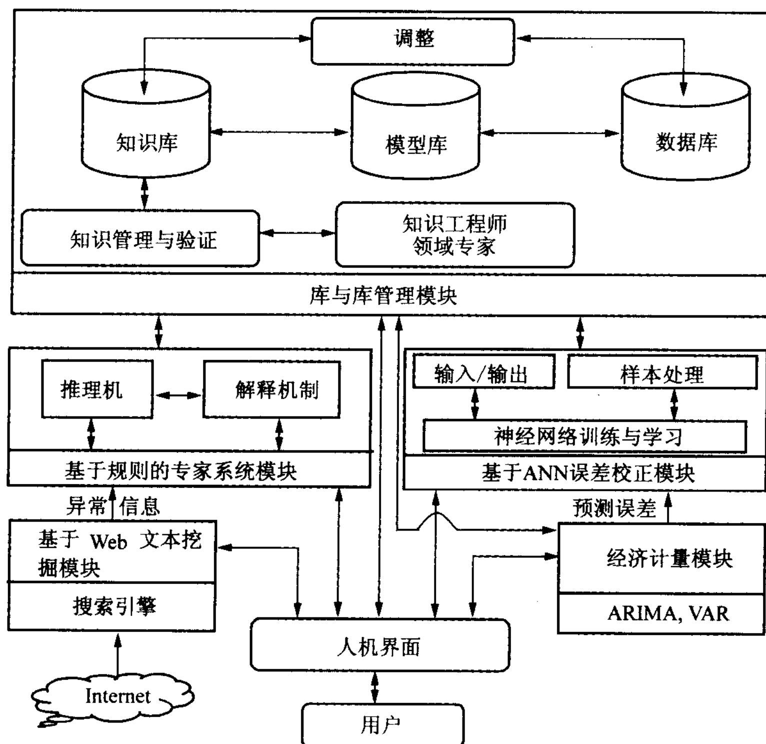


图 1　基于 TEI@I 预测方法论的总体框架架构

复杂系统分解，利用经济计量模型来分析对复杂系统呈现的主要趋势，利用人工智能技术来分析复杂系统的非线性与不确定性，然后利用文本挖掘等技术来分析复杂系统的突现性与不稳定性，最后基于集成的思想，把以上分解的复杂系统的各个部分集成起来，形成对复杂系统整体的认识，从而达到分析复杂系统的目的。

基于处理复杂系统的 TEI@I 方法论理论基础，我们针对外汇汇率预测问题构建了一个基于 TEI@I 方法论的预测模型的理论框架。与 TEI@I 方法论基本思想一样，基于 TEI@I 的预测模型是以集成技术为核心，以人工神经网络技术为集成工具，将文本挖掘技术，传统的计量经济模型，人工智能技术(如神经网络、专家系统和粗集理论等)综合集成起来，具体理论框架结构如图 1 所示。

从图 1 可以看出，这个 TEI@I 方法论的预测模型的总体框架包括六个主要的模块：人机界面模块、基于 Web 的文本挖掘模块、经济计量模块、基于规则的专家系统模块、基于神经网络的误差校正模块以及库与库管理模块。

(一) 人机界面模块

在 TEI@I 预测方法论中，人机界面(Man-Machine Interface, MMI)是一个用户与 TEI@I 预测系统人机交互信息的图形化窗口。它的主要目的在于处理用户与系统之间的输入/输出信息。同时，它也是库与库管理模块构建过程中计算机与知识工程师或领域专家的交流信息的平台。同样，这个人机界面模块也可以与其他四个主要模块(即基于 Web 的文本挖掘模块、经济计量模块、基于规则的专家系统模块、基于神经网络的误差校正模块)进行交互。因此在某种意义上，这个人机界面模块是用户与 TEI@I 预测系统其他模块之间进行交互的开放平台。

(二) 基于 Web 的文本挖掘模块

这个模块是 TEI@I 方法论的主要组件之一 考虑到外汇市场的不稳定性与波动性，而这些波动经常是一些突发的重要事件所引发的。而在外汇汇率预测中，这些重大事件对他们的影响往往是不能被忽略的。为了提高预测性能，一些相关的重要事件必须考虑到预测系统中来。因此有必要收集各种来源的重要事件，并量化他们的影响。鉴于篇幅，我们这里略去了文本挖掘模块的详细描述，感兴趣的读者请阅读文献[6]和其他相关文献。

(三) 基于规则的专家系统模块

专家系统成功应用的核心在于知识库，在本文中的知识库主要由各种类型的规则组成，是由知识工程师从各个渠道(如历史知识推理或咨询领域专家)收集和总结出来的知识。在这里，专家系统主要是用来提取规则和获取知识。在外汇汇率预测中，专家系统模块的主要任务是通过推理来提取价格波动与重要突发事件的关系来

判断价格的变动情况。

在基于规则的专家系统模块中，推理机(Inference engine，IE)和解释机制(Explanation mechanism，EM)通过用户界面可与用户交互。推理机和解释机制主要是提供自动的规则对比与规则解释。这样，通过文本挖掘模块与专家系统模块，不规则事件对价格波动的影响我们就可以捕捉到。这里这部分不规则突发事件对价格的影响被当作判断性调整来作为集成预测的一部分。

通过文本挖掘与专家系统，我们可以量化一些不规则因素和重要事件对外汇汇率的影响，如表1所示。

表1　不规则因素对外汇汇率波动的影响

编号	影响因素	影响条件	影响方向
1	市场非常规需求	增加/减少	上升/下降
2	市场非常规供应	增加/减少	下降/上升
3	国民生产总值	增加/减少	上升/下降
4	通货膨胀率	增加/减少	下降/上升
5	利率	增加/减少	上升/下降
6	失业率	增加/减少	下降/上升
7	外贸盈余	增加/减少	上升/下降
8	政治稳定性	增加/减少	下降/上升
9	交易者心理预期	增加/减少	不确定
10	谣言与假新闻	增加/减少	不确定
11	政府对市场的干预	增加/减少	不确定

(四) 经济计量模块

经济计量模块包括大量的建模技术与模型。究其根源，其根本都是基于回归的思想。因此，经济计量模块大部分方法都将使用回归技术来预测。它分为普通回归分析和多层递阶回归分析两类。

普通回归分析法是一种应用广泛、理论性较强的定量预测方法。它的基本思路是分析预测对象与有关因素的相互联系，用适当的回归预测模型(即回归方程)表达出来，然后再根据数学模型预测其未来状态。多层递阶预测方法是运用现代控制理论中的系统辨识方法而提出的一种预测理论，它突破了一般统计预测方法中所使用的固定参数预测模型，而将预测对象看成是随机动态的时变系统，其基本思想是把时变系统的状态预测分离成对时变参数的预测和在此基础上对系统的状态预测两部分，对时变参数的预测导致状态预测误差的减小。多层递阶方法把动态系统看成

是一个一维或多维的时间序列,从系统的外部特征着手,建立其输入、输出模型。它依据大量的历史资料进行序列的多层分析,使预测模型的建模过程所依据的信息大大增加,使所得的模型能较好地反映系统的历史演变规律,从而有利于提高模型对预测的适应性。

在本文中,经济计量模块主要用来捕捉价格波动中的主要趋势部分,对于非线性部分,我们用非线性技术来拟合,这里我们用人工神经网络来进行。

(五)神经网络模块

由于外汇汇率的随机性、多样性、时变性同时存在,而传统预测方法的数学模型往往无法精确地描述价格波动与影响因素之间错综复杂的关系,在解决这方面的问题上,人工神经网络中的多层前向网络模型(BP 神经网络模型)[7]具有独到的优势。鉴于篇幅,我们这里略去了文本挖掘模块的详细描述,感兴趣的读者请阅读文献[7]和其他相关文献。

(六)库与库管理模块

库与库管理模块是我们新方法论的重要组成部分,包括模型库(Model base, MB)、知识库(Knowledge base, KB)和数据库(Database, DB)。新方法论的每一个模块都与这个模块有着密切的联系。例如,经济计量模块与神经网络模块需要利用模型库和数据库,而基于规则的专家系统则需要使用知识库和数据库,如图 1 所示。

在库与库管理模块中,知识库是由知识工程师或领域专家知识的集聚和历史经验的推理,如从数据库中的历史数据可以抽取有用的信息。某种意义上讲,知识库的好坏决定了我们方法论的预测能力。数据库是由一些相关的数据组成,这个库模块相对较易形成。而模型库是我们组成方法论的模型、方法与技术。这里主要支持神经网络模块和文本挖掘模块。

在库与库管理模块中,知识库有上千条的表示领域专家启发式规则和经验性规则。知识管理与验证利用知识获取工具可以为知识库增加新规则、修改和删除旧规则。同时,知识管理与验证还能检查知识库的一致性、完备性和冗余性。利用知识获取工具,领域专家可以抽取规则,使之成为“IF... THEN...”的格式,并自动转化为内部编码形式。当新规则增加之后,知识库验证器就要检查新规则增加后所引发的不一致性、不完备性和冗余性,保证知识库的正常运行。此外,调整引擎(Tuning engine (TE))通过分析最新的事件和他们相应的规则变化,从而来调整知识库的知识。在动态环境下,由于信息更新的加快,持续的知识调整是非常必要的。

基于 TEI@I 方法论的预测模型的理论框架,我们接下来具体地阐述基于 TEI@I方法论的外汇汇率预测模型。

三、基于 TEI@I 方法论的外汇汇率预测模型的建模思路与模型构建过程

由于外汇市场具有高度的波动性和不确定性，外汇汇率不仅呈现线性和非线性的特征，而且由于受一些不规则性突发事件的影响，外汇汇率还经常出现一些不规则型波动，因此单独的线性模型或非线性模型及两者的混合都不能充分建模与预测。除了线性模型和非线性模型之外，有必要导入新技术来捕捉这种不规则性的突发事件的影响。因此在本文我们外汇汇率预测建模的基本思路是：首先，利用 ARIMA 模型来对外汇汇率序列的线性趋势建模；其次，利用 ANN 模型拟合外汇汇率序列的非线性趋势；接下来，利用文本挖掘和专家系统技术来捕捉和量化重要事件对外汇汇率的影响，最后，利用集成预测技术将这三者综合集成，形成一个集成的预测结果。基于 TEI@I 方法论的理论框架，我们构建了基于 TEI@I 的外汇汇率非线性集成预测模型，图 2 显示了这个基于 TEI@I 方法论的外汇汇率非线性集成预测模型的基本建模思想。

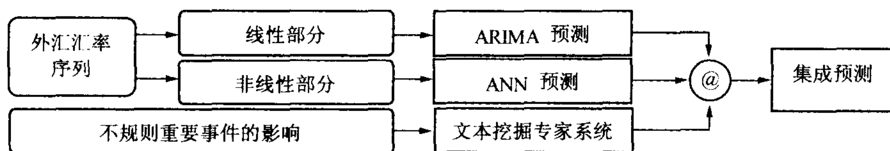


图 2　基于 TEI@I 的外汇汇率非线性集成预测模型的基本建模思想

从图 2 中可以看到，基于 TEI@I 的外汇汇率非线性集成预测模型是由四个主要的程序模块组成，主要包括线性的 ARIMA 模块、非线性的 ANN 模块、文本挖掘模块及专家系统模块。这四个模块主要产生三个外汇汇率预测的主要结果，即线性预测、非线性预测和不规则重要事件影响。最后通过非线性集成预测技术，将这三者综合集成。这里综合集成的目的是为了创造一种协同效应，提高模型的预测能力。

具体而言，我们按照下面的步骤来进行建模预测。假设外汇汇率序列为 $\{X_t, t=1,2,\cdots\}$。首先，用 ARIMA 模型去拟合外汇汇率序列线性部分，产生一个预测，记为 $\{\hat{E}_t\}$；因为外汇汇率的影响因素非常复杂，单单一个线性模型是不足以预测的。通过对比 X_t 与 $\hat{E}_t$，我们可以得到外汇汇率的误差序列部分，记为 $\{e_t\}$，即：

$$e_t = X_t - \hat{E}_t \tag{1}$$

其次，我们用 ANN 去拟合外汇汇率序列的非线性误差序列部分，可以产生一个预测，记为 $\{\hat{I}_t\}$。实际上，误差序列部分实际上是在做一个非线性映射，即：

$$e_t = f(e_{t-1}, e_{t-2}, \Lambda, e_{t-p}, \quad (2)$$

用 ANN 去预测外汇汇率序列的非线性误差序列部分，实际上是对 ARIMA 模型误差部分进行校正，因此 ANN 也可称为误差校正神经网络(ECNN)模型。

第三，一些不规则的重要因子(如失业率增加、外贸赤字和经济衰退等)，我们通过文本挖掘来总结，然后用专家系统来量化这些事件的影响，这些影响记为$\{\hat{T}_t\}$。这里专家系统融合了人类专家和领域知识工程师的主观判断。因此这部分预测我们可以看成是专家的判断性调整(Judgmental adjustments)。

第四，将前面三者$\{\hat{T}_t, \hat{E}_t$ 和 $\hat{I}_t\}$组合，构成一个混合模型，即：

$$\hat{H}_t = \hat{T}_t + \hat{E}_t + \hat{I}_t \quad (3)$$

第五，除了用 ANN 预测误差序列之外，我们也使用单独的 ANN 预测整个外汇汇率序列，得到一个 ANN 的预测结果，记为$\{\hat{N}_t\}$。另外我们用单独的 ARIMA 模型来预测原始外汇汇率序列，可得到一个预测结果，记为$\{\hat{L}_t\}$。

最后，我们将上面的结果集成起来，形成一个非线性集成预测，其形式为：

$$\hat{Y}_t = f(\hat{T}_t, \hat{E}_t, \hat{I}_t, \hat{H}_t, \hat{L}_t, \hat{N}_t) \quad (4)$$

式(4)中，$f(\cdot)$是一个非线性函数。在[6]中，$f(\cdot)$是由神经网络(ANN)来实现非线性映射的。我们这里使用支持向量机回归(Support Vector Regression, SVR)[8]来实现非线性映射来确定非线性函数的参数。

简单地讲，在支持向量回归集成预测模型中，我们需要估计集成预测与单独预测之间的一种函数依赖关系。和其他回归模型一样，支持向量回归集成预测模型假设集成预测与单独预测之间的存在着如下一个确定性的函数关系：

$$y = f(x) + \varepsilon \quad (5)$$

式(5)中，ε 是一些可加噪音。现在的任务是利用支持向量回归(SVR)在确定函数形式 f。通过将单独预测的结果作为训练集，通过一个序贯优化(sequential optimization)过程可以获得这个函数关系。其中估计的参数就是我们集成预测的权重，不同之处在于集成的形式是一种非线性的形式。值得注意的是利用支持向量回归来集成预测的模型结构与神经网络基本结构相似，如图 3 所示。

从图 3 可以看出，支持向量回归集成预测模型也是由输入层、中间层和输出层组成。与神经网络不同的是中间层，也就是中间层每个节点的输出是经过核函数转换过后的支持向量。但是，经过这种变换，神经网络的许多缺陷(如局部极小和过度拟合等)却能被克服，从而在集成预测中发挥较好的集成功能。

实际上，支持向量回归集成可以看成是如下的一个非线性处理系统，即

$$\hat{y} = f(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \Lambda, \hat{x}_n) \quad (6)$$

式(6)中，$(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \Lambda, \hat{x}_n)$是单独预测模型的预测结果，$\hat{y}$ 是集成预测结果，$f(\cdot)$是一个由支持向量回归确定的非线性函数。具体的做法是将单独预测模型的预测结果作为支持向量回归模型的输入，利用核函数(Kernel function)将它们转换为支

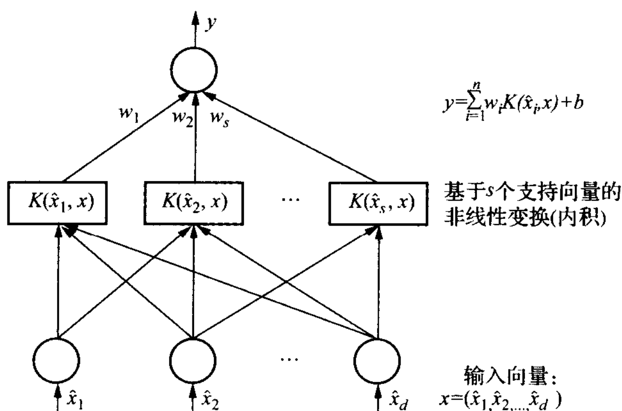


图 3　支持向量回归集成预测模型

持向量,然后进行学习,进而获得最优解的过程。在这个意义上,支持向量回归集成也是一个非线性集成方法。

四、实证分析与研究结果

(一) 数据源及评价规则

本文选择欧元兑美元、英镑兑美元和日元兑美元进行预测对比。数据是 1993 年 1 月至 2004 年 12 月的月度数据,取自于加拿大 Pacific Exchange Rate Service (http://fx.sauder.ubc.ca)网站。我们取 1993 年 1 月到 2000 年 12 月的数据作为模型的训练集,用来建立神经网络模型。取 2001 年 1 月到 2004 年 12 月的数据作为模型的测试集,基于同样的评价准则来测试基于 TEI@I 外汇汇率预测模型的推广能力,从而验证模型的有效性和可靠性。为了节省空间,具体的数据我们这里没有列出,有兴趣的读者可以从相关站点检索。

为了评价预测性能,我们使用规范化的均方误差($NMSE$)和方向变化统计量(D_{stat})作为评价准则。其中,规范化的均方误差($NMSE$)定义如下:

$$NMSE = \frac{\sum_{t=1}^{N}(x_t - \hat{x}_t)^2}{\sum_{t=1}^{N}(x_t - \bar{x}_t)^2} = \frac{1}{\sigma^2} \cdot \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=1}^{N}(x_t - \hat{x}_t)^2 \quad (7)$$

式(7)中,x_t 为实际值,$\hat{x}_t$ 为预测值,$\bar{x}_t$ 为均值,σ^2 为数据的估计方差,N 为测试期。

然而,从投资者角度来看,规范化的均方误差($NMSE$) 并不能给他们带来直接

的决策建议,因此与投资决策相关的评价准则——方向变化统计量(D_{stat})被用来评价预测效果,其定义为:

$$D_{stat} = \sum_{t=1}^{N} a_t / N \tag{8}$$

其中,如果$(x_{t+1}-x_t)(\hat{x}_{t+1}-x_t)\geqslant 0$,$a_t=1$;否则 $a_t=0$。

(二) 实验结果及分析

在我们的实验中,所有的 ARIMA 经由 Eviews 软件包实现,文本挖掘和专家系统是用 SAS Text Miner 和 Prolog 来实现,而 ANN 模型和集成预测模型通过 Matlab 软件包实现。表 2 和表 3 从不同的评价指标的角度给出了相应的评价结果。

表 2　基于 *NMSE* 指标的对比

方法 \ 外汇	欧元/美元		英镑/美元		日元/美元	
	NMSE	排位	NMSE	排位	NMSE	排位
ARIMA 模型	0.0462	4	0.0937	4	0.4442	4
ANN 模型	0.0343	2	0.0431	1	0.3956	3
混合模型	0.0365	3	0.0758	3	0.3795	2
TEI@I 模型	0.0234	1	0.0446	2	0.2573	1

从 *NMSE* 的角度来看,除了英镑兑美元的例子外,基于 TEI@I 方法论的非线性集成预测模型预测效果最好,其次是神经网络预测模型。总的来讲,非线性集成预测模型是非常有效的。有趣的是,这里混合模型的预测效果居然不如两个单独的模型,这与 Zhang[9] 的研究结果是截然不同的。可能的原因有二:一是 ARIMA 和 ANN 建模条件不同;二是使用的数据区间不同。

然而,较小的 *NMSE* 未必意味着较高的 D_{stat}。作为一个直观的交易决策指标,D_{stat} 比 *NMSE* 更重要。表 3 列出了基于 D_{stat} 的详细结果。

表 3　基于 D_{stat} 指标的对比

方法 \ 外汇	欧元/美元		英镑/美元		日元/美元	
	D_{stat}(%)	排位	D_{stat}(%)	排位	D_{stat}(%)	排位
ARIMA 模型	56.25	4	58.33	4	52.08	4
ANN 模型	68.75	2	72.91	2	60.41	3
混合模型	66.67	3	68.75	3	66.67	2
TEI@I 模型	85.42	1	87.50	1	77.08	1

从表 3 可以看出，对于三种测试的外汇汇率，基于 TEI@I 方法论的非线性集成预测模型的预测效果最好。在比较的几个模型中，不同模型之间的差异是非常大的。例如，在欧元兑美元的例子中，单独 ARIMA 模型的 D_{stat} 只有 56.25%，单独的 ANN 模型仅有 68.75%，对于混合模型也只有 66.67%，而非线性集成预测模型 D_{stat} 则高达 85.42%。通常，混合模型处于中间位置，主要原因在于一些单独模型可能包含了一个冗余信息和噪声，从而影响了最终的预测结果。而单独 ANN 模型相对于混合模型效果要好一点，主要原因在于 ANN 具有较好的非线性预测能力。最后我们也注意到：对于三种外汇汇率，单独的 ARIMA 效果最差，主要原因在于外汇汇率序列中含有一些复杂的噪声和非线性因素，而 ARIMA 是一类线性预测模型。

通过前面的分析，我们可以肯定：基于 TEI@I 方法论的非线性集成预测模型在外汇汇率预测中明显优于单独的线性模型（如 ARIMA），单独的非线性模型（如 ANN）和两者的混合模型，因此基于 TEI@I 的非线性集成预测模型结果是令人满意的。

三个主要原因可以解释上面的结论：第一，如 Chen 和 Leung[10] 所说，误差校正（Error correction）能够有效改进预测效果；第二，如 Edmundson 等人[11] 和 Wolfe 与 Flores[12] 所说，判断性调整（Judgmental adjustment）能够显著地改进预测结果，获得更好的预测效果；第三，非线性集成预测技术能够创造出一个协同效应，从而改进模型的整体预测性能。

五、结　　论

基于 TEI@I 方法论的理论框架，本文构建了一个基于 TEI@I 方法论的误差校正和判断性调整融合的非线性综合集成预测模型，并利用此模型详细地介绍了外汇汇率预测的过程。通过实证分析我们可以得到如下结论：首先，在外汇汇率预测中，误差校正和判断性调整相融合的非线性综合集成预测模型能够产生一个有显著改进的预测结果。其次，非线性集成预测优于单独的线性模型和非线性模型。最后，基于前两个结论，为了提高外汇汇率预测的精度，基于 TEI@I 方法论的误差校正和判断性调整融合的非线性集成预测模型可以作为一个有效的外汇汇率预测工具。

参 考 文 献

[1] Deboeck, G. J. *Trading On the Edge: Neural, Genetic, and Fuzzy Systems for Chaotic Financial Markets*. New York: Wiley, 1994

[2] Yaser, S. A. M., Atiya, A. F. Introduction to financial forecasting. *Applied Intelligence*, 1994, 6

[3] Yu, L., Wang, S. Y., Lai, K. K. Are foreign exchange rates predictable? A survey from artificial neural networks perspective. Submitted to *International Journal of Forecasting*, 2004

[4] Hann, T. H., Steurer, E. Much ado about nothing? Exchange rates forecasting: neural networks vs. linear models using monthly and weekly data. *Neurocomputing*, 1996, 10

[5] Wang, S. Y. TEI@I: a new methodology for studying complex systems. *The International Workshop on Complexity Science*, Tsukuba, Japan, April 22—23, 2004

[6] Wang, S. Y., Yu, L., Lai, K. K. Crude oil price forecasting with TEI@I methodology. *Journal of Systems Science and Complexity*, 2005, 18(2)

[7] Rumelhart, D., Hinton, G., Williams, R. Learning internal representations by error propagation. In: Rumelhart, D., McClelland, J. (eds.). *Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition*, 1986, 1 Cambridge, MA: MIT press.

[8] Vapnik V. *The Nature of Statistical Learning Theory.* New York: Springer-Verlag, 1995

[9] Zhang, G. P. Time series forecasting using a hybrid ARIMA and neural network model. *Neurocomputing*, 2003, 50

[10] Chen, A. S., Leung, M. T. Regression neural network for error correction in foreign exchange forecasting and trading. *Computers & Operations Research*, 2004, 31

[11] Edmundson, B., Lawrence, M., O'Connor, M. The use of non-time series information in sales forecasting: a case study. *Journal of Forecasting*, 1988, 7(3)

[12] Wolfe, C., Flores, B. Judgmental adjustment of earning forecasts. *Journal of Forecasting*, 1990, 9(4)

系统工程专业教育的创建

汪　浩　谭跃进

国防科学技术大学，长沙，410000

1979年经邓小平同志同意，长沙工学院改建为国防科技大学，列入军队院校序列，归属国防科工委领导。钱学森副主任受国防科工委党委委托，亲临长沙主持学校组建工作。他亲自作报告，召开教师座谈会，进行调查研究。钱老提出："按学科设系，理工结合，以工为主"的组建方针，转变了原军事工程学院按军兵种设系，按武器装备型号设专业的格局。这个组建方针是钱老根据科学技术发展规律，吸收国内外办大学的经验，结合我军培育人才的特点而提出的，它为往后国防科技大学的发展壮大，出人才，出成果奠定了基础，开辟了前进通道。据此，国防科技大学共组建了8个系，其中七系，全名为系统工程与数学系，它把在中国新兴的管理技术——系统工程，与独特于自然科学之外的数学，联结在一起成为一个系，这在古今中外是一个创造，体现出钱老的中国人民有志气自主创新的科学思想和胆识魄力。

为组建七系，钱老调集了飞行器总体专业、电子信息专业、计算机专业等部分骨干教师，联同原数学教研室全体教师一起，构成七系教师的班底，由孙本旺教授任系主任，并指定他的亲密战友许国志研究员兼任系副主任。钱老召集两部分教师座谈，谆谆教导搞系统工程的同志要学习数学方法，搞数学的同志要贴近工程实际，发挥学科交叉的优势。

对于专业设置，钱老认为，"系统工程的各个分支就是各门专业，如工程系统工程专业、经济系统工程专业、行政系统工程专业、科研系统工程专业、军事系统工程专业、后勤系统工程专业、资料库系统工程专业以及质量保障系统工程专业等"。在钱老的指导下，七系的学科专业建设紧紧围绕部队和军工发展需要的"信息、装备、人才"三要素，促成了"理、工、军、管"多学科的交叉融合。对于七系的课程设置，钱老指出，"大学一年至两年自然要学基础课以及外语和政治课。基础课还是数学、物理和化学，可能内容和比重和一般工程技术的大学有所不同，要做些调整和更动。"钱老还特别指出，"搞系统工程离不开电子计算机，不会用电子计算机的系统工程的毕业生是不可想象的。"根据钱老的指示，七系按照"数学、英语、计算机、科学实验"四个不断线的模式设置课程，理顺了课程系列之间的关系。对于教材的编写和修订，钱老建议，应当仿效20世纪20年代化学工程、航空工程，50年代核能工程、计算机技术，60年代激光技术等的教学方式，"教学生的过程也是研究学问的过程，教师

一面研究一面教，学生一面学一面研究”。根据钱老这一教学思路，七系着力强调科学与科研的相互促动作用，以重大科研方向带动学科专业的不断发展和壮大，注重从科学研究成果中提炼并更新教学内容，保持了教学内容的前沿性，也进一步促进了科研水平的提高。

钱老还强调：搞系统工程，不能坐而论道，要明确服务对象，七系首先要抓飞行器系统工程与信息系统工程。他指定上述两领域的两本国外的参考书，要求大家每周讨论一次，由一名教师重点准备作中心发言，大家讨论，最后总结，明确问题，下周继续同样进行。这样，使教师很快地明确学科的前进方向。与此同时，钱老建议与七机部一院、军队有关部门等加强联系，相互派员定期交流，共同立项开展科学研究，比较顺利地完成一批科研成果。在闯与创的思想指导下，七系开始走出一条路子来了。

由于钱老在全国倡导系统工程，农业现代化研究中心首先响应，与七系挂起钩来，着手用系统工程方法来研究农业现代化问题，而不是孤立地依靠单项农业技术的进步。为培育农业系统工程人才，先后在湖南桃源和黑龙江海伦开办了三期学习班，从而使系统工程首先闯进了农业广阔天地，七系周曼殊教授被誉为“农业系统工程的开拓者”。钱老闻讯给予大力支持，并热情地为此举鼓与呼！

在湖南省政协委员的建议下，省科委支持七系与省社会科学院等单位合作立项，运用系统工程方法研究浏阳县经济、科技、社会十年发展规划，获得成功，为区域规划提供新模式，被许多市、县推广。该项目荣获国家科技进步二等奖。该项目的工作经验，为钱老提升吸收，并与多方面的研究成果结合，形成了由钱老提出的“从定性到定量综合集成研究方法”——系统工程方法论。

湖南省委组织部还委托七系承办“湖南省领导干部系统工程培训班”，从 1984 年开始，每期半年，一直延续下来办了 21 期。

国防科技大学系统工程与数学系在钱老勇于创新、自主创新的科学思想指导下，前后经历了 20 年。在这 20 年中，呈现一片兴旺景象，出人才，出成果，培育出不少优秀人才。主持国防大学作战仿真的胡晓峰技术少将，航天科技集团八院院长袁杰、美国麻省理工学院终身教授崔之元、美国耶鲁大学教授陈志武、国防科技大学理学院院长吴翊教授，都毕业于七系。特别要指出的是两名被中央电视台东方之子报道的七系学子：一名是号称中国的比尔·盖茨求伯君；另一名是中科院系统科学研究所所长、973 项目首席科学家高小山，他们是七系系统工程专业的毕业生，他们在自己的事业中均有突出的自主创新思想和卓越的科研成果。这充分说明，由钱老创建的七系确实具有学科交叉和自主创新的优势。

回顾历史，不能不令人对钱老的英雄气概和自主创新的科学思想肃然起敬。诚如宋健同志在 2001 年钱学森院士九秩寿辰报告会上报告标题所指出的：钱学森同志是——科学技术的巨擘，中国人民的骄傲！

系统科学方法论及在典型信息法中的应用

李世辉

中国科学院工程地质力学重点实验室，北京，100027

笔者是一名工程师，从事岩石力学研究与地下工程设计。为了研究与解决本专业几个复杂性难题，在实践中学习钱学森有关论著，得到启发和支持，并有幸得到钱学森先生来信的关心和帮助。本文简述粗浅认识，水平所限，局限性难免，甚至可能有狭隘性，敬请指正。

一、系统科学方法的源头：半经验半理论方法

（一）贝塔朗菲论系统研究中的半经验半理论方法

贝塔朗菲指出：系统研究方法的“必要性来自这样的事实，即可隔离的因果链和分部处理的机械论模式，已不足以解决生物、社会科学等理论问题，而且也不足以解决现代技术提出的实践问题。”“机械论方法所忽视的并起劲地加以否定的，正是生命现象中最基本的那些东西。”[1] 贝塔朗菲创立的系统论就曾被看作是“虚假的”和“易生歧义的”，在哲学和方法论上“无根据的”。原因是系统的“不可还原性”与分析性的研究相矛盾[1]。

贝塔朗菲论述了系统研究中两条可能的途径或方法：第一种是直觉方法，本质上是经验论的方法，优点是相当接近实在，容易借助个别例子来表述和验证，但缺乏逻辑严密性和完备性；第二种是推理方法，面临着基本项的选择是否正确的问题，而且与经验事实的联系十分微弱。贝塔朗菲强调指出：**一般系统论“就像任何一个科学领域一样，它不得不依靠着经验、直觉和推理手段的配合使用而发展。”**[1]

上述事实表明：贝塔朗菲开创的系统科学（当时名为一般系统论）是从方法论的角度切入的。他对系统科学研究的途径（方法）的“不得不依靠着经验、直觉和推理手段的配合使用”的总结性的论述，表明“半经验半理论方法”在系统科学方法论研究中，事实上处于源头地位。

笔者感到需加以说明：对于以简单系统为研究对象的学科（如物理学），实践证明：经验、直觉的应用是在科学研究的前期，即提出经验性假设（或定性与半定量分析）的阶段；而推理手段的应用主要是在演绎证明（定量分析）阶段。两者应该也可

以截然分开。但是,对于以开放的复杂巨系统为研究对象的系统科学,虽然也“**依靠着经验、直觉和推理手段的配合使用而发展**”,但突出特点是:不仅在经验性假设阶段,经验、直觉和推理手段往往需要综合应用,密不可分,在演绎证明阶段同样如此。这一特点决定了系统科学方法论与西方近、现代科学方法论之间,存在着根本区别。

(二)钱学森坚持和发展半经验半理论的观点

在开放的复杂巨系统中,社会系统是最复杂的一类;社会系统中,战争又是最复杂的系统。这是因为双方是武装着的活人,而又互相保持秘密,进行殊死斗争的缘故。以作战指挥为例,战场情况瞬息万变,不可能对敌我双方情况及其认识过程进行严密的、精确的定量研究,作战指挥历来应用整体观察和宏观经验判断方法,即整体论方法。兰彻斯特(F. W. Lanchester,1868—1946)在军事科学中首次把科学与经验结合起来。

1982年钱学森在指导王寿云撰写《现代作战模拟》一书时,讨论了兰彻斯特的作战模拟工作。兰彻斯特在1916年发表的关于战斗单位数量损失率的两组微分方程,是克劳塞维茨《战争论》中两条作战经验的科学表达,是科学与经验巧妙结合的产物。钱学森提出一个见解:**处理作战模拟的定量方法学,是科学理论、经验和专家判断力的结合,这种定量方法学,是半经验半理论的。**[2]

钱学森首次将专家判断力纳入作战模拟的定量方法学,并且与科学理论、经验并列。笔者认为,这里的“处理作战模拟的定量方法学”,不仅指的是兰彻斯特提出这两组微分方程,而且在一定程度上也应包括联系实际应用这两组微分方程的用户。例如,每个战斗的具体情况各不相同,应用对象是比较接近于兰彻斯特线性率?还是兰彻斯特 N^2 率?采用哪个方程?接近程度如何?或者都不适用?应用中需要考虑哪些该微分方程中未包括的因素的影响?等等,这一系列问题都离不开专家判断力和决策。因此,对于实际应用的正确与否来说,专家判断力是决定性的因素。

钱学森强调专家判断力是作战模拟的定量方法学的必要因素,并且把这样的定量方法学概括为半经验半理论,在系统科学研究中具有重大意义。钱学森上述见解非常透彻和精辟,但是需要具体阐述,才能广为理解和应用。他的好学生王寿云出色地完成了这一历史任务。

(三)王寿云对钱学森精辟观点的创造性的阐发

为什么说王寿云是钱学森的好学生?因为王寿云对钱学森的话,不是照着说,而是接着说。他总结了在钱学森指导下从事复杂性问题认识与处理的多年实践经验,作了创造性的阐发。王寿云的有关论述非常精辟,在系统科学界引起高度关注,经常被引用,就是有力的证明。

王寿云在“科学与经验相结合的作战模拟研究途径”(以下简称“途径”)一文中写道:

“1982 年在讨论兰彻斯特的工作时，钱学森同志提出过一个见解：处理作战模拟的定量方法学，是科学理论、经验和专家判断力的结合，这种定量方法学，是半经验半理论的。**我从这一见解得到启发，提出经验性假设（猜想或判断），是建立复杂作战模拟模型的出发点**。这些经验性假设（猜想或判断）不能用严谨的科学方式证明，但需要用经验性数据对其确实性进行检测。从经验性假设（猜想或判断）出发，通过定量方法学途径获得的结论，仍然具有半经验半理论的属性。当人们寻求用定量方法学处理复杂行为系统时，容易注重于数学模型的逻辑处理，而忽视数学模型微妙的经验含义或解释。要知道，这样的数学模型看来‘理论性’很强，其实不免牵强附会，从而脱离真实。与其如此，还不如从建模一开始就老老实实承认理论不足，而求援于经验判断，让定性的方法与定量的方法结合起来，最后定量。这样的系统定量分析方法学是建模者判断力的增强与扩充，是很重要的。就作战模拟研究来说，兰彻斯特和杜派等人的贡献，都建立在经验性理论基础之上，都是经验与科学相结合的产物”，等等[2]。

王寿云 1988 年 12 月 3 日为《论系统工程》写的“增订版说明”中，根据钱学森当时认识的发展，将“途径”一文中关于“作战模拟的定量方法学”的提法，扩充为“处理复杂行为系统的定量方法学”，其他文字基本未变。王寿云写道：

“钱学森认为：处理复杂行为系统的定量方法学，是科学理论、经验和专家判断力的结合，这种定量方法学，是半经验半理论的。**钱学森的这一见解曾经给我重要的启发。提出经验性假设（猜想或判断），是建立复杂行为系统数学模型的出发点**。……”[3]从语法和标点符号看，后者在文字上对“提出经验性判断”的主体（即王寿云）的说明也是比较明确的，但不如“途径”一文明确无误，可能有不同的理解；加以王寿云“途径”文于 1988 年 5 月发表于《军事系统工程》，读者面较小，远不如《论系统工程》增订版影响广泛。这可能就是有的学者将王寿云在钱学森启发下提出的上述观点，往往作为钱学森的论述加以引用的原因。依笔者拙见，为了尊重钱学森先生一贯坚持的严谨的科学态度，纪念王寿云先生的学术贡献，还是如实地澄清为好。

二、钱学森对复杂性具体问题研究提供了宝贵的启发和支持

（一）综合集成法对具体的复杂系统问题研究提供巨大支持

钱学森明确指出：从定性到定量综合集成法是建筑在《实践论》的基础上的，其工作过程是以《矛盾论》为指导思想的。这就是说，在建立数学模型的曲折过程中，要发现主要矛盾及矛盾的主要方面。而且要千万记住：矛盾是在发展运动，会转化的。[4]钱学森坚持科学与哲学结合，坚持毛泽东思想的指导，言传身教，这是对中国复杂性研究根本性的、最大的启发和支持。

根据钱学森的观点:对于门类繁多的工程技术来说,由于都离不开具体的环境和条件,都必须改造客观世界并取得实际成果,也就都不得不面对和处理各类复杂性问题。因此,一切比较能够适应复杂的环境和条件的、行之有效的工程技术方法,都必须考虑复杂性的经济因素和社会因素,都不是纯理论分析或经验分析,而只能是经验分析与理论分析的结合,即半经验半理论[5]。例如,在世界各国的地下工程技术规范中,都把经验性的工程类比法置于首要地位,同时强调结合应用围岩变形监测法,以及理论分析法。

从事工程技术复杂性问题研究,不得不突破还原论,从中西文化互补中找出路往往是一条可行途径。在"西方中心论"事实上居于中国科学界主导地位的情况下,困难重重、坐冷板凳、前途未卜是难免的。笔者有幸得到钱学森提出的从定性到定量综合集成法的启发、支持和他的具体帮助,经过十余年的研究和数以百计的、开放式的工程实践验证,在中国岩石力学和地下工程界,开放的复杂巨系统的方法论已经得到一部分处于学术前沿的主流科学家的承认。"**地下工程半经验半理论设计方法的理论基础——围岩一支护系统是一种开放的复杂巨系统**"一文,被安排在2002年3月《**岩石力学与工程学报**》刊首发表,就是一个明显的标志[6]。

（二）钱学森从方法论角度论述复杂性

钱学森反对泛泛地讨论复杂性,主张把复杂性作为系统属性来对待。他对系统的分类就是基于复杂性的不同层次给出的。复杂性研究不能从严格界定复杂性概念开始。钱学森指出:**要建立开放的复杂巨系统一般理论,必须从一个一个具体的开放的复杂巨系统入手**[7],只有这样,这些研究成果多了,才能从中提炼出一般的开放的复杂巨系统理论[9]。

20世纪90年代初,钱学森进一步从方法论的角度对复杂性(如复杂巨系统)问题作出界定:从系统科学观点看来,凡现在不能用还原论方法处理的或不宜用还原论方法处理的问题,而要用或宜用新的科学方法处理的问题,都是复杂性问题,复杂巨系统就是这类问题[9]。

在新的历史条件下,钱学森的这一界定,有力地推进了贝塔朗菲开创的、从方法论角度开始的系统科学研究路线。对于工程技术复杂性问题研究者来说,根据钱学森的这一界定,既能明确研究问题的性质属于复杂性问题,也为应用半经验半理论方法找到合理依据,如同在茫茫大海中看到一盏指路明灯。

三、提炼从定性到定量综合集成法的一个典型个案

毛泽东指出:"**任何领导人员,凡不从下级个别单位的个别人员、个别事件取得具体经验者,必不能向一切单位作普遍的指导。**"[10]"**从研究典型着手是最切实的办**

法,由一个典型再及另一典型。”[13]

钱学森提炼从定性到定量综合集成法,对半经验半理论作出划时代的重大发展,有一个长期的研究和实践的过程。钱学森在指导王寿云的研究中提炼半经验半理论方法之后,又亲自总结了另一个典型个案。

1983—1985 年,在马宾、于景元的具体指导下,完成了国家体改委委托的“财政补贴、价格、工资综合研究”与相应的国民经济发展预测。当时已经有将“粮油倒挂”的“暗补”变为“明贴”的改革思路,但是,到底零售价格调整到什么水平,工资提高到什么水平,才能取消财政补贴又不降低人民实际收入水平,必须有可信的定量研究才能回答。这是当时经济体制改革中的一大难题。

在此项研究中,把经济学家、各有关部门管理专家和系统工程专家组织起来(以下称专家群体),从当时的经济体制、运行机制、管理体制与机制等各个方面进行研究和讨论,以明确问题的症结所在,找出解决问题的途径,从而形成**对问题的定性的经验判断。这是准确把握问题的实质和定量研究的基础**。随后把问题纳入系统框架,研究系统的结构和功能,界定系统边界、环境变量、状态变量、调控(政策)变量和输出(观测)变量等,**为模型设计提供定性基础**[12]。

系统建模是以市场平衡为中心建立的。在结构上,一部分是国民收入分配和零售市场,另一部分是各产业部门的投入产出关系。前者由 115 个变量和方程式描述,包括 14 个环境变量和 6 个调控变量;后者是 237 个部门的产业关联矩阵。系统建模所需近万个真实数据,都是在政府有关部门大力支持提供资料的基础上整理得出的。

按照不同的国力条件(环境变量)、调控变量(价格、工资)、调整起始时间、调整幅度、调整方法(一次到位或多次调整),在大型计算机 B6810 上,进行了 105 种政策模拟,以市场平衡、货币流通与储蓄、职工与农民收入水平为评价标准,寻求最优、次优、满意和可行的调整政策,从而定量回答问题。

有了定量结果,再请专家群体分析、评议,通常是有些问题的,需要修正模型和调整参数,重复上述工作。直到各方面专家都认为结果是可信的,再作结论。最后提出五种政策建议,上报供中央决策参考。这项研究成果对物价改革起了积极的推动作用,受到中央领导的高度评价。

这套方法本来是基于实际需要,从实际出发逼出来的,当时没有人想到其中还有什么深刻道理。但是,钱学森却从中概括、提炼出“从定性到定量综合集成法”[12]。实践证明,钱学森善于从个别事件取得具体经验,善于从研究典型着手,由一个典型再及另一典型,从而有能力对系统科学研究作普遍的指导。

四、典型信息法

社会实践和自然科学史(天文、地质、生物学史中的实例见参考文献[13])表明:

典型信息法对于整体论与还原论结合，对于半经验半理论和从定性到定量综合集成法，都是一种行之有效的、应用比较广泛的、具体的应用形式[13]。

（一）典型信息法研究背景

岩石力学是一门技术科学，主要任务之一就是在地下工程设计和施工阶段，对周围岩体（简称围岩）的稳定性提供分析预测。

岩石力学以还原论为指导思想，沿用“力学试验”加“数学分析”的方法。但是，其研究对象——岩体却经历过多次地质构造运动的变形和破坏，是复杂的地球表面系统的一个部分；在地下工程的开挖、支护过程中，复杂的岩体系统又与难以定量描述的人为因素耦合。围岩稳定性问题是一种开放的复杂巨系统。高度简化的力学方法和复杂多变的岩体，构成岩石力学的主要矛盾。由此决定其两大前沿课题——岩体力学机理模型和岩体力学参数，几十年来虽有若干研究进展，始终未得解决。

岩石力学理论分析结果往往与实际情况相差很远，以至不能领导产业的发展，在世界各国有关技术规范中均被置于末位，而经验性的工程类比法居于首要地位。以还原论为基础的现代科学技术处境尴尬。

（二）典型信息法要点

笔者曾试图系统综合多种国内外先进技术解决上述难题，均以失败告终。逐渐认识到“**系统环境复杂，关键信息匮乏**”是问题的关键。1982 年冬，在“山重水复疑无路”中，突然联想到毛泽东倡导的“**从研究典型着手**”，“**一般和个别相结合**”的方法[11,10]，既然已经有效地解决了中国革命战争（一种最复杂的系统）问题，为什么不能用于解决当代的系统科学、信息科学技术难题？于是，以毛泽东哲学、军事思想为指导，充分调动一切可用的、先进的科学技术因素，将人文、社会科学的典型方法从整体上用现代科学技术加以量化，提出典型信息法假说。

典型信息法要点（应用条件）：①该类系统的整体行为有可观测性（有可控性为佳）；②已知系统行为的简化的理想模型；③已查明同类系统存在典型个体（典型信息源）；典型个体的整体行为已有系统、完整、可信度高的现代科学技术测试资料，代表性好，为同行公认；④用典型信息对理想模型加以拟合，使分析值与典型个体整体行为的实测值充分接近；⑤用科学分类作桥梁，为同类个体行为的预测，类比提供所匮乏的、概略的关键性信息；⑥典型信息法是一种假说—演绎方法，其可信度经验值，由分析预测值与实测值之比统计得出。

典型信息法是中西文化优势互补的产物，是从定性到定量综合集成法的一种应用形式[13]。

（三）工程应用与验证简介

（1）典型信息法第一个应用形式——**典型类比分析法**：用典型信息拟合不完善的理论分析模型，形成半经验半理论的典型信息模型，类比应用于同类个体。

1989年以来，经过数以百计的地下工程的应用和分析结果的实践检验，典型类比分析法应用软件用于设计阶段，围岩稳定性分析预测的可信度经验统计值，不小于0.70～0.90。在国际岩石力学界影响较大的工程验证，是1991年10月对当时世界最大的**二滩水电站导流隧洞**的软弱围岩区段，所作的围岩稳定性**施工设计复核**。工程实践表明，典型类比分析法的分析结果（支持原设计）符合实际，而国外一流建筑承包商的分析预测（必然坍塌）是错误的。

1994年总参谋部兵种部组织的技术鉴定一致认为：此项成果总体上达到国际先进水平，在5个特点方面居于国际领先地位。有关成果在有重要影响的（SCI&EI）国际期刊上两次发表。

（2）典型信息法另一应用形式——**变形速率比值判别法**：在隧道施工中，当地质条件突然出现前所未知的重大变化时，准确、及时、定量地判别围岩稳定性的国际技术难题，应用该工程的实测变形速率比值与典型工程的变形速率比值给出的阈值之比，得以初步解决。有关成果在有重要影响的（SCI&EI）国际期刊上发表。

典型工程实例：1999年在**猫山隧道施工**中，应用变形速率比值判别法曾两次化险为夷，一旦弃而不用就发生了大塌方，从而这一判据得到正、反两方面严格的实践检验。

经大量工程验证，典型类比分析法与变形速率比值判别法均已纳入国家军用使用标准，在全军施行。

（四）序是开放的复杂巨系统的宏观稳态特征

钱学森指出："序是开放的复杂巨系统的宏观稳态特征。"[4]实践证明，"开放的复杂巨系统的序"[4]的具体表现形式之一，就是反映系统整体行为的可观测量。例如，典型信息法用于"围岩稳定性分析预测"时，"围岩变形量测资料"是反映围岩整体的宏观稳态特征的可观测量（同时又是可控制量）；典型信息法用于"恒星内部结构与演化研究"时，"太阳的光度和表面温度"是反映太阳的整体的宏观稳态特征的可观测量。[13,14]

五、对从定性到定量综合集成法的三点初步认识

80年代末，钱学森提出处理开放的复杂巨系统的方法论是"从定性到定量综合集成法"。作为一门技术，又称为综合集成技术；作为一门工程，亦可称综合集成工

程。[12]可见，钱学森对综合集成法是从方法论、技术科学、工程技术三个层次分别看待的。

（一）从科学方法论层次看综合集成法

西方科学传统重理性，心、物两分，重逻辑推理，线性因果关系的实验与分析结合，西方近现代科学方法的核心是还原论。经验和专家判断力历来被排除于正规的科学研究方法之外。

当代的科学发展正经历着从大物理时代向复杂性研究的转变。系统科学的先驱贝塔朗菲预见到系统科学本质上是研究复杂性的科学[7]。钱学森指出："还原论与整体论要结合起来，是系统论。"[4]整体论反映系统全局。但是，**"全局性的东西眼睛看不见，只能用心思去想一想才能懂得。"**[15]

如果进一步思考，对于"眼睛看不见，只能用心思去想一想才能懂得"的全局的认识和判断，已经不是一个可以脱离人的头脑的思索，与思索者的主观认识截然分开的东西。这是一种能动的反映，而且必须冒相当程度的风险。

从定性到定量综合集成法是还原论与整体论的结合，是理性、逻辑与非理性、非逻辑的有机结合。综合集成法的形成和具体应用，既有直觉或顿悟的成分（如当时没有人想到在"财政补贴、价格、工资综合研究"中，还有什么深刻道理，钱学森却从中概括、提炼出"从定性到定量综合集成法"），这种"在实践的基础上主体对客体的能动反映"[16]，一方面与中国古人所说的主客一体，物我两忘的状态似有相通，另一方面，又能从整体上对客体作出比较有效的定量描述和预测。在还原论和整体论结合中，从提出包括经验、专家判断力在内的半经验半理论方法的一刻起，钱学森已经颠覆了主客两分的严格界限。

从定性到定量综合集成法实是综合集成定性认识达到整体定量认识的方法[4]。据笔者在复杂性研究实践中的粗浅体会，钱学森所说的"整体定量"，不是对系统整体的精确定量，更不是逐点、逐时刻的精确定量，而是对系统整体的**概略定量**。具体来说，就是只求适用于某一时段（或时刻）的，有一定可能性（即"**概**"）的、对系统整体粗线条描述（即"**略**"）的定量。

综上所述，在科学方法论层次，钱学森明确提出包括专家群体经验、专家判断力在内的从定性到定量综合集成法，是开放的复杂巨系统的科学方法论；这是对迄今居于主流地位西方还原论传统科学观念的突破，是一个石破天惊的、经得起实践检验的发展，因而这是钱学森对复杂性研究的历史性重大贡献。

（二）从技术方法层次看综合集成法

从定性到定量综合集成法（及其某些应用形式，如典型信息法）是在电子计算机出现并有长足发展的历史条件下提出的。没有这种处理大量信息的能力，20 世纪

80年代的中国，根本不可能解决“财政补贴、价格、工资综合研究”问题，也不可能初步解决“围岩稳定性分析预测”问题。“解决开放的复杂巨系统问题，就连现代每秒几亿次的计算机，以至每秒万亿次的计算机都不够用。我们必须动脑筋，出点子，使计算量控制到机器能力之内。”[4]这就进一步证明，在人-机结合中必须以人为主。

明确提出在计算机技术的基础上综合集成，必须人机结合，以人为主，而不是以计算机为主，或单纯寄希望于计算机，在技术方法层次具有普遍的意义。这是钱学森对复杂性研究的又一历史性重大贡献。凡是复杂性问题的认识和处理，都是以人为主的。但是，有的复杂性问题理论研究或方法、途径的开拓创新，不一定都用计算机。因此，在技术方法层次，半经验半理论的普适性大于综合集成法。

（三）从工程方法层次看综合集成法

在工程方法层次：从定性到定量综合集成法研讨厅用于中国军事系统与某些社会系统等有重大作用，是钱学森对复杂性研究的历史性重大贡献。但是，较多的典型个案以及典型信息法的实践表明，复杂性研究在工程方法层次上，研究对象不同，可能多种多样，大有发展空间。研究者可以用从定性到定量综合集成法（半经验半理论）的某一其他具体形式，解决某一类复杂性问题。其典型个案请参阅参考文献[14]中徐钦琦、褚德萤、赵少奎等科学技术自主创新实例。

六、结　语

从不同的角度与层次剖析，系统科学方法的源头、基础和普适形式是半经验半理论。质言之，系统科学方法论的根本是半经验半理论。

中国科学技术工作者有幸在钱学森的启发、指导和帮助下学习和工作，是难得的机遇，也是一种激励。王寿云师从钱学森，立足实践，开拓创新，接着说、接着做，为我们树立了好榜样。中国人应当对于人类有较大的贡献。

参考文献

[1] [美]冯·贝塔朗菲：《一般系统论：基础、发展和应用》．北京：清华大学出版社，1987，10～12，93

[2] 王寿云：《科学与经验相结合的作战模拟研究途径》，《军事系统工程》．1988(1)．8～11

[3] 王寿云．增订版说明．见：钱学森等．《论系统工程》(增订本)．长沙：湖南科学技术出版社．1998.

[4] 钱学森关于开放的复杂巨系统的书信．见：王寿云等．《开放的复杂巨系统》．杭州：浙江教育出版社．1996．268，269，271，278，295，297

[5] 钱学森等.《论系统工程》. 长沙:湖南科学技术出版社. 1982. 176,211
[6] 李世辉,吴向阳,尚彦军:地下工程半经验半理论设计方法的理论基础——围岩－支护系统是一种开放的复杂巨系统[J].《岩石力学与工程学报》. 2002. 21(3)
[7] 许国志主编.《系统科学》上海:上海科学技术出版社. 2000 年
[8] 王寿云等:《开放的复杂巨系统》杭州,浙江教育出版社. 1996
[9] 于景元:钱学森关于开放的复杂巨系统的研究.《系统工程理论与实践》. 1992(5)
[10] 毛泽东:《关于领导方法的若干问题》.《毛泽东选集(第三卷)》. 北京,人民出版社. 1991 年
[11] 毛泽东:中共中央关于调查研究的决定.《毛泽东选集(第二卷)》. 北京,人民出版社
[12] 于景元等:关于复杂性研究.《系统仿真学报》2002. 14(11)
[13] 李世辉:复杂性工程技术问题研究实践与科学方法论思考.《中国工程科学》. 2002. 4(11)
[14] 李世辉:科技自主创新与中西文化互补之我见.《中国工程科学》. 2005. 7(4)
[15] 毛泽东:中国革命战争的战略问题.《毛泽东选集,第一卷》. 北京,人民出版社. 1991 年
[16] 赵光武主编:《思维科学研究》. 北京,中国人民大学出版社,1999 年

金融市场的复杂性建模

张 维[1,2] 刘文财[2] 王启文[2] 刘 豹[2]
1. 天津财经大学，天津，300222； 2. 天津大学管理学院，天津，300072

传统的金融经济学理论在完全理性的经济学假设基础上，通过将金融资产价格运动的不确定性归结为“随机性”，进而运用随机分析的数学工具和经济学理论，经过上个世纪后半叶的努力，终于建立起来一整套对于金融市场价格运动的模型和理论体系。然而，随着社会经济和金融创新的不断发展，近十年来金融市场上越来越多地出现了不能被标准的金融经济学理论所解释的所谓“异象”，从而对这个理论体系提出了挑战，并产生了对于金融系统建模的新需求。

从系统工程的角度看，一个经济中的金融市场就是一个以在空间和时间上优化配置社会的资金资源作为目标的系统。按照钱学森院士的定义，这样的系统是一个典型的“开放的复杂巨系统”，这是因为，第一，这个系统本身与其周围的环境有大量的资金和信息交换；第二，这个系统是由大量的市场参与者组成的，而每一个参与者都可以看成是一个独立的决策子系统，其决策机制、决策目标是演化的，并与系统内的其他决策子系统以及系统的外部环境产生信息交换；第三，作为市场的参与者，不仅投资者、交易所及其他中介机构、政府监管部门的特性是各有差异的，而且在同一类参与者（如投资者）中，每一个主体的决策行为都是“异质的”。

因此，不是简单地通过直接观察金融资产价格的运动，并寻求其规律，而是利用复杂性科学的理论和方法，深入到每一个“异质的”市场参与者之个体行为及其相互作用和演化运动，从而通过“涌现”的方式来获得关于金融市场的整体动态行为的规律，这可能是一条新的研究方法论途径。

实际上，这种趋势与人们对经济系统复杂性越来越多的认识密切相关。经济系统的外在现象的复杂性不能在完全理性的“经济人”的假设下得到合理的解释，以完全理性的“经济人”假设为基础的新古典经济学理论和基于其上的数学模型几乎无法在面对风险和不确定状态因素时提供决策所需要的信息。在某种意义上，2002年诺贝尔经济学奖获得者卡恩曼和史密斯从经济学理论基础的角度推动了对于金融市场的复杂性建模。他们的主要贡献正是在不确定条件下的人为判断和决策方面的发现。由有限理性主体（个人和企业）所组成的复杂经济系统使得传统借助线性数学工具的描述方法陷入了前所未有的困境，而非线性数学工具仍处于襁褓之中，难以担此大任。正是在这种背景下，计算实验金融学应运而生。本文主要介绍

计算实验金融学的概念、研究内容、发展方向以及与其他金融学分支之间的关系，以推动国内在此领域研究的发展。

一、金融市场：一类复杂自适应系统

众所周知，预测是困难的，在金融市场——这个人类创造的机构中，投资者是多么热切地渴望他们能对明天的价格做出某些程度的预测；学者们也深切地感受到投资者的期盼而穷其毕生精力力图理清市场的价格是怎么形成的，资本是如何从一个投资者流向另一个投资者的。他们通过对金融市场的各种简化，包括对投资者的预测与决策方式、市场机制等简化，建立一个完整的分析框架来帮助我们理解原本也是我们创造的市场。这些模型解释了一些现象，但留下了许多未能回答的问题，并且提出的问题比回答的多。经济学家往往发现，与理论预计相反，他们预测的有效性十分有限。

这种情况是由于金融市场的复杂性造成的。当然，对于金融市场的复杂性，经典金融经济学家也早有认识，只不过他们更多地把复杂性归结于外界随机信息冲击的结果，而很少考虑复杂性内生的可能性。因此，他们对金融市场的基本思想是秩序外加随机冲击。体现在模型上就是确定性方程加上随机变量。也就是说，他们处理复杂性的方法是引入随机变量，即在变化的某一环节中引入外来的随机因素，按照一定的分布影响演变的过程。这种方式中，随机因素的作用是“暂时的”，只在一个特定步骤上起作用。它只是通过其对系统状态的某些指标产生定量的影响。在这种影响过后，事物只是在状态参数上有所变化，而运作的规模、内部的机制并没有质的变化。形象地说，系统不会因此而“演化”（许国志，2000）。这种模型曾经给投资者带来过希望，也对现代金融学的发展做出了不朽的贡献，但它们毕竟是在简化了金融市场上投资者预测与决策机制的前提下推出来的，虽然它们解释了一些现象，但还有许多现象无法用它们的模型来回答。

随着系统科学的发展，如耗散结构理论、协同学、分形与混沌、复杂自适应系统等理论的创立，使人们对系统的复杂性产生机制有了进一步的认识。尤其是 Santa Fe 研究所提出了所谓“复杂自适应系统 CAS(Complex Adaptive System)”的概念，认为系统的复杂性是由系统中主体性元素（adaptive agent）适应环境的结果（Holland ，2001）。

CAS 系统由“agent”组成。在一般系统论中，系统的个体称为元素、部分或子系统。而 CAS 系统用“agent”这个词是为了强调它的主动性，强调它具有自己的目标、内部结构和生存动力（许国志，2000）。在 CAS 系统中，agent 与 agent 之间以及 agent 与环境之间存在非线性的作用机制。CAS 系统由于 agent 之间及其与环境的交互而产生不可预期的整体性。另外，CAS 的 agent 能够适应其他 agent 的行为及

环境的约束。整个 CAS 系统是随时间进化的。如果用 CAS 系统来描述金融市场，则其 agent 就是投资者。

让我们用一个普通人而非学者的眼光来看看金融市场。金融市场是由金融产品原始提供者(如上市公司)、交易所与投资者组成的系统。系统的输入是信息流与资金流，系统的输出主要是价格与成交量。当然输出与输入之间存在着反馈作用。对于市场的交易行为而言，可以认为金融产品原始提供者(如上市公司)与交易所在系统的三个组成部分中是相对固定的、“死”的因素，而投资者则是灵活多变的、“活”的因素。综合世界各国金融市场，虽然不同上市公司与交易机制所产生的股票价格及成交量序列是不同的，但它们的宏观统计特性却是相同的。譬如回报序列的分布都是尖峰、胖尾的，且回报波动集群、长期相关等。因此我们坚信在金融市场中，其复杂性的决定因素主要的不是上市公司与交易机制，而是千差万别的投资者。实际市场中的投资者并非像传统金融理论中所假设的那样，是具备完全信息的。在不具备完全信息条件下的投资者对信息有不同的反应方式，有不同的预测与决策机制；每个投资者在已有的信息下做出预测及投资决策形成了市场价格，反过来市场价格所包含的信息又影响投资者的预测及决策。这样每个投资者根据市场状态变化及学习成功者的经验不断地形成新预测规则，并验证与修改预测规则。从而每个投资者的预测规则与市场是协同进化的。且在此进化过程中，投资者的聚集*、分化**、对信息的非线性反应方式造就了整个金融市场宏观层面上的复杂性。总之，金融市场宏观层面上的复杂性是由微观层面上各个投资者不断适应市场环境造就的，金融市场是一类复杂自适应系统。

二、面向金融市场复杂性建模：计算实验金融学

1. 计算实验金融学的概念

面对金融市场的复杂性，一向披坚执锐的线性数学分析方法，如趋势分析、均衡分析、样本均值等陷入了前所未有的困境(Holland ，2001)。而非线性数学方法目前仍处于襁褓之中，难以担此重任。这促使圣达菲研究所 SFI (Santa Fe Institute) 研究人员 Authur ，W. B. ，J . H. Holland ，B. LeBaron ，R. G. Palmer ，P. J . Taylor 使用了基于 agent 的计算机模型(而不是解析的数学模型！)来研究金融市场，建立了所谓人工股票市场 ASM (Artificial Stock Market)，在手段上开创了实验金融学的先河。他们从 1990 年开始，到 1997 年论文“Asset Pricing Under Endoge-

* 聚集是指各个投资者通过组成基金的形式进行投资。

** 分化是指投资过程中因能力的差别而导致财富拥有量的不同。

nous Expectations in an Artificial Stock Marker”(Arthur ，W. B ，et al ，1997)的发表，标志着金融学中又一分支——基于 agent 的计算实验金融学的诞生。

计算实验金融学是指应用计算机技术来模拟实际金融市场，如股票市场、外汇市场、期货市场等，在既定的市场结构下，通过研究市场微观层次 agent(投资者)的行为来揭示市场宏观特性形成原因的一门金融学分支。它的理论基础是复杂自适应系统 CAS。基本思想是把市场中的投资者定义为具有自适应性的 agent ，由它们在各个证券上作投资组合。各个 agent 有不同的预测与决策机制，并且预测规则能够随着市场状态的变化而进化。通过设定初始市场结构，模拟实际市场的演化过程。研究内容包括 agent 投资策略、市场价格形成机制、财富在各 agent 之间的分配规律及市场宏观特性的涌现(emergence)的原因等。

2. 计算实验金融学研究现状及未来发展

目前计算实验金融学研究领域主要集中于股票市场与外汇市场。在股票市场研究上，主要有美国 SFI 研究所的人工股票市场 ASM ，中国台湾 Cheng Chi 大学人工智能与经济研究中心的人工股票市场 AIE-ASM。它们都是在 Grossman & Stiglitz (1980)理性预期均衡模型所描述的市场结构基础上发展起来的。目前两者都能产生与实际股票市场具有相同统计特性的时间序列。不同的地方是在 agent 学习机制上，前者是个体学习，后者是社会学习(Shu-Hen Chen ，Chia — Hsuan Yeh ，2001)。外汇市场研究上，主要的成果是由加拿大 Simon Fraser 大学经济系的 Jasmina Arifovic 教授(1996)作出。J. Arifovic 在继承了 Karehen & Wallace (1981)关于外汇市场一般均衡理论的基础上，提出了价格空间中的多点均衡理论。Arifovic 对计算实验金融学的贡献主要有：①他研究了在一般均衡集中内生价格形成的均衡问题；②他把从人工外汇市场实验得出的动态学习机制与 Gode & Sunder (1993)随机学习机制进行了对比；③他使用基于 agent 的 GA (Genetic Algorithm)的学习机制得到的关于外汇市场的一些特征与他从实验中得到的特征一样，而这些特征在其他学习机制中是看不到的。

从目前的状况来看，计算实验金融学的发展将可能沿着以下方向逐步发展。第一，进一步加强对于人工金融市场建模技术本身的研究，从而使这类建模技术能够更加好地描述各类不同的现实金融市场(例如股票市场、债券市场、外汇市场等等)的行为。例如像 LeBaron (2000)指出的那样，对于单个 agent 的设计与数据的表示；关于 agent 的学习与进化问题；关于 agent 的学习对(versus)进化关系问题等等。同时，将计算实验同以实际投资者为对象的实验技术相对比，也将有助于这类建模技术本身水平的提高。第二，需要进行以计算实验技术为工具的金融学理论研究，特别是充分利用这类技术可以设置微观层面上的个体投资者的决策行为特征、微观市场结构特征的优势，开展用其他研究方法不可能研究的金融经济学理论问题

（例如，对于股票价格过度波动原因的新探索）。第三，利用成熟的建模技术和对现实金融市场运动规律的把握，将人工金融市场同真实金融市场连接，形成所谓“平行系统”，从而实现对真实市场的在线仿真和优化调控，这将对整个金融体系的运作产生巨大的影响。

三、计算实验金融学的建模方法

面对金融市场的复杂性，计算实验金融学所采用的建模方法是自下而上（Bottom-up）的方法。以下以 SFI 的人工股票市场为例说明。

1. 人工股票市场

人工股票市场最早是在 1990 年由 W. Brain Authur ，John Holland，Blake LeBron ，Richard Palmer，Paul Taylor 和 Brandon Weber 等各学科的专家吸收 Bray (1982)、Grossman & Stiglitz (1980)的部分成果共同建立起来的，几经修改与完善。最近的关于这个人工市场的完善工作是由 SFI 的研究生 Shareen Joshi 在其导师 Jeff rey Parker 和 Mark Bedau 指导下完成的。人工股票市场模型包含以下一些假设：

市场中的投资者由许多不同的缺乏远见的、非完全理性的 Agent 组成。这些 Agent 可根据其对未来市场状态的预测来作投资决策，并能向过去的投资经验学习。

市场中的可供投资证券有两种：一种有限供给的有风险的股票，其股息为 dt；另一种是无限供给的无风险债券，其固定利率为 r_f。每个 Agent 在期初被赋予一定数目的资金，并在每一个模拟的时间段内在两种证券上作投资组合决策。这种决策是建立在他们对股票价格及其风险（用价格的方差来表示）预测基础上作出的。预测的规则由一套 IF-THEN 逻辑语句构成。

市场中有做市商 Agent (market maker)。做市商会用一套技术来确定市场的出清价格。

2. Agent 预测规则及投资决策

模型中的 Agent 必须在他们对下一时期股票价格预测的基础上作投资组合决策。预测规则是由一系列 IF-THEN 逻辑语句组成。如，IF（市场的状态为 Di）THEN($a = k_j, b = k_l$)这里 Di 是市场状态，k_j、k_l是常数，a、b 是预测方程参数，其初始值从关于股票价值的均匀分布函数中随机选取。预测方程为：

$$E(P_{t+1} + d_{t+1}) = a\,(P_t + d_t) + b \quad (1)$$

其中，P_t为股票在 t 时刻的价格，d_t为 t 时刻的股息。

市场状态描述器{Di}对应于通过对股票价格与股息的历史数据分析而确定的市场状态。因此，描述器实际上是关于大量市场状态的一组布尔函数。每一规则对于大量市场状态的反应可表示为一组二进制数组。1 表示只要状态是真的，规则被运用；0 表示只要状态是假的，规则被运用；# 表示状态与规则运用与否不相关*（Shareen Joshi et al，1998）。

预测的结果用来计算面临的投资风险，Agents 根据此风险作投资决策。每个 Agent 都有一个与绝对风险厌恶系数无关的 CSRA（constant absolute risk-aversion）效用函数，

$$U(W_{i,t+1}) = -\exp(-\lambda W_{i,t+1}) \tag{2}$$

效用函数最大化的约束条件：

$$W_{i,t+1} = X_{i,t}(P_{t+1} + d_{t+1}) + (1 + r_f)(W_{i,t} - P_t X_{i,t}) \tag{3}$$

这样就可得到各个 agent 的需求量。

$$X_{i,t} = \frac{E_{i,t}(P_{t+1} + d_{t-1}) - P_t(1 + r_f)}{\lambda \sigma^2_{i,t,p+d}} \tag{4}$$

交易时，假设股票是完全可分的，Agent 的买卖量不必是整数。股票的总需求量等于市场中总股份数。

各 Agent 把决策指令传给做市商——一个特殊的 Agent。做市商收集所有买卖指令，并宣告一个“成交价格”。如果市场并没有被清出或做市商的库存不在可接受的数量之内，则重复这个过程。当市场被清出时，则“成交价格”为目前市场价格。

3. 预测规则的进化

模型预测规则的进化使用了遗传算法 GA（Genetic Algorithm）。当 GA 被激活时，各 agent 不好的预测规则将被最适合的预测规则部分所替代。一条规则成功与否取决于它预测股价的准确性及复杂程度（GA 不善用复杂的规则）。新规则是通过不好规则遗传因子的突变（mutation）、交换（crossover）以及较成功规则遗传因子上 0、1 位置的颠倒而产生的。子代预测规则的参数 a，b 是父辈参数的线性组合。新规则的初始精确度等于父辈规则精确度的平均值。

四、计算实验金融学与其他新兴金融理论分支的关系

通过不断地回应现实金融世界中提出的“金融异常”问题的挑战，现代金融学已经不断发展，演化出一些重要的新兴分支。除了计算实验金融学之外，还有金融市

* 如模型中有 10 个布尔市场状态描述器，则模型能区分 2^{10} 个市场状态。

场微观结构理论、行为金融学等。微观结构理论问世于20世纪60年代末，行为金融学诞生于20世纪80年代中期，计算实验金融学诞生于20世纪90年代，它与上述新兴金融学分支的总体关系是既有区别又有联系。总体的区别是建模方法上的区别：计算实验金融学模型是计算机模型，而其他则是数理模型；而总体上的联系则是它们都是从不同的市场要素侧面来研究这些要素的行为/规则变化对市场总体行为产生的影响。

1. 计算实验金融学与金融市场微观结构理论

一般认为，金融市场微观结构理论的核心是要说明在既定的市场微观结构下，金融资产的定价过程及其结果，从而提示市场微观结构在金融资产价格形成过程中的作用。微观结构有别于一般意义的组织结构，市场微观结构的概念有狭义和广义之分。狭义的微观结构概念仅指价格发现机制，广义的市场微观结构是各种交易制度的总称，包括价格发现机制、信息传播机制、清算机制等诸方面(戴国强和吴林祥，1999)。从表面上看，两者都是通过金融市场的微观层面的研究来解释宏观的价格行为，但两者的侧重点是不同的。微观结构理论所关注的是金融市场中“死”的约束，即各种交易制度。在这些“死”的约束条件下，通过简化投资者的差别，探讨金融资产价格形成过程。在它的框架里面，在价格的形成过程中约束条件是主要的，投资者选择是次要的。而计算实验金融学则相反，它关注的是市场中“活”的元素，即千差万别的投资者，研究在简化市场结构条件下，众多相异的投资者在适应市场过程中形成不同的预测与决策机制，进而决定了金融资产的价格形成过程。当然，两者之间也是有联系的。如人工股票市场中的市场结构就来自微观结构理论中理性预期均衡模型所假设的市场结构。

2. 计算实验金融学与行为金融学

行为金融学是通过研究投资者普遍存在的心理认知偏差(如过分自信、典型启示等)对投资决策的影响，解释股票市场中普遍存在的股价异常现象*。围绕这个思想，行为金融学者们提出了许多理论模型。如 Fischer Black (1986)的噪声交易理论、Daniel Kahneman & Amos Tversky (1979，1992)的期望理论、Barberis，Nicholas，Andrei Shleifer & Robert Vishny (1998)的 BSV 模型、Daniel，Kent D.，David Hirshleifer，Avanidhar Subrahmanyam (1998)的 DHS 模型等。这些理论模型都在某一侧面对股价的异常现象进行了行为心理学的解释，他们的成果是相当引人入胜的。一方面，对计算实验金融学来说，行为金融学是基础。因为就目前的

* 股价异常现象从大的方面看，可以分为四个种类，分别为基本面异常、技术异常、日期异常和其他异常(Investor Home，2000)。

人工股票市场而言，还没有考虑各个 Agent 的心理因素在其投资决策中的影响。如在各个 agent 的效用函数中还假设它们的绝对风险厌恶系数，即 Arrow-Pratt 系数相同。而行为金融学的期望理论则对预期效用理论进行了修改，用效用/价值函数代替标准效用函数(Daniel Kahneman & Amos Tversky , 1979 , 1992)。因此，行为金融学理论的突破为计算实验金融学的模型更符合实际的金融市场奠定了基础。另一方面，行为金融学理论也需要计算实验金融学来实证。行为金融学理论关于投资者的心理认知偏差等心理行为是从心理学实验中得到的。然后行为金融学家用数学的工具建立一个分析型的模型。用数学工具建模的前提假设是市场中的投资者只能是有限几类，或是假设市场的参与者是由理性交易者与噪声交易者组成，或是不分投资者的类型，仅认为投资者是非完全理性的。因此行为金融学分析型的模型不能容纳市场中有千差万别的投资者，而计算实验金融学中的模拟型模型则能做到这一点。因此行为金融学理论的进一步发展要得到计算实验金融学平台的支持。总之，两者之间的关系是相辅相成、互为促进的。

虽然，相对于实验经济学来说，计算实验金融学的兴起时间要晚得多，但它们所基于的思想是一脉相承的。首先，它们认为经济系统或金融市场是由相互影响的有限理性个体、而非相互独立的完全理性个体所组成，因此，作为一个系统，它们是复杂的。其次，个体之间以及个体与环境之间的相互作用是以非线性而不是线性方式进行的，所以造就了经济系统或金融市场宏观上的复杂性。因为这个原因，所以不能为了迎合数学模型的简便而简化市场中个体行为的多样性与复杂性。第三，它们都需要在理论、观察、经验等基础上，提出科学假说，并设计实验来验证这些假说是否成立，进而以此创造出新的金融经济学理论知识。但是，与一般的实验经济学研究相比，计算实验金融学的实验方式是不相同的：前者主要利用真实的人而后者则完全利用计算机来模拟人的行为。其优点在于，利用计算机仿真可以排除很多非可控实验因素的干扰，并且发挥计算机的计算速度以及海量存储的优势，进行大量的实验。但其缺点也是明显的：利用计算机仿真的投资者决策行为依然是一个比较简化的行为模型。不过无论如何，当传统的数学工具不能用来描述金融市场这样的复杂系统之时，借用计算机的海量存贮与快速计算能力人们就可能为实际经济系统或金融市场建立一个具体而微观的模型，形成一个经济学或金融学的“实验室”。在这样的实验室中，金融经济学家可以做与物理学家、化学家同样意义上的实验。因此，金融学由观察与逻辑演绎走向实验，对于金融资产定价、价格行为复杂性的形成机制、市场的非理性行为、市场的财富流向等方面的研究具有十分重要的意义。

计算实验金融学作为现代金融学的一个新兴分支，其所基于的哲学思想、理论基础和研究方法论都彻底脱离了传统金融学研究的思想藩篱。以动态而非静态、进化而非僵化、非线性而不是线性的观点来看待金融市场，这更符合金融市场的实际。

因此，它的发展将掀起金融学的又一次革命。

参 考 文 献

[1] 田宏伟：中国股价异常现象行为金融学分析与非线性特征研究．天津：天津大学博士学位论文，2001 年

[2] Edgar E. Peters. 王小东译.《资本市场的混沌与秩序》. 北京：经济科学出版社，1999

[3] 许国志.《系统科学》. 上海：上海科技教育出版社，2000

[4] Holland. J . Modeling Complex Adaptive System . 2001

[5] Arthur , W. B. , Holland ,J. , LeBaron ,B. , Palmer. R and P. Taylor. Asset Pricing Under Endogenous Expectations in an Artificial Stock Market [C] . in W. B. Authur , S. Durlauf , and D. lane , eds. , The Economy As An Evolving Complex System II. Reading, MA ;Addison-Wesley. 1997

[6] Grossman , S. , Stiglitz , F. On the impossibility of informationally efficient market s[J] . American Economic Review , 1980 , 70 ;393—408

[7] Shu-Heng Chen , Chia-Hsuan Yeh. Evolving traders and the business school with genetic programming ; A new architecture of the agent-based artificial stock market [J] . Journal of Economic Dynamics & Control 25 ,2001 ,363—393

[8] Arifovic , J . The behavior of the exchange rate in the genetic algorithm and experimental economies[J] . Journal of Political Economy ,1996 ,104 ;510—541

[9] Kareken , J. , Wallace ,N. On the indeterminacy of equilibrium exchange rates [J] . Quarterly Journal of Economics ,1981 ,96 ;207—222

[10] Gode ,D. K. , Sunder , S. Allocative efficiency of market s with zero intelligence t raders [J] . Journal of Political Economy ,1993 ,101 ;119—137

[11] Blake LeBaron. Agent-Based computational finance ; Suggested readings and early research [J] . Journal of Economic Dynamice & Cont rol. 2000 ,24 ;679—702

[12] Bray , M. Learning , estimation , and the stability of expectations [J] . Journal of Economic Theory ,1982 ,26; 318—339

[13] http ;/ / www. santaFe. edu/ sfi/ publications/Bulleins/ bulletinFal199/ news

[14] Shareen Joshi , Jeff rey Parker , and Mark A. Be dau. Technical Trading Creates a Prisoner's dilemma ; Result s f rom an Agent-Based Model [J] . SFI working paper. 1998. http ;// www. santafe. edu

[15] 戴国强、吴林祥:《金融市场微观结构理论》. 上海财经大学出版社，1999

[16] Fischer Black (1986),"Noise", J of Finance ,Vol. XL I , No. 3 , pp529 — 54

[17] Investor Home (2000) ,"Historical Stock Market Anomalies", Researching Report , URL ; http ;/ /www. investorhome. com/ anomeal. htm

[18] Kahneman Daniel , and Amos Tversky (1979) . "Prospect Theory; An analysis of Decision under Risk. ", Econometrica , vol. 47 ,No. 2 (March) ;263—291

[19] Kahneman Daniel , and Amos Tversky (1992) . "Advances in Prosect Theory : Cumulative Representation of Uncertainty. "Journal of Risk and Uncertainty , Vol. 5 , No. 4 (October):297—323

[20] Barberis Nicholas , Andrei Shlerfer , and Robert Vishny (1998) ,"Investor psychology and securitymarket under and over-reactions", Journal of Finance 53 , 1839—1886

社会经济系统的综合集成研究

周晓纪
中国航天科技集团公司710研究所，北京，100037

“从定性到定量综合集成方法（Meta-Synthesis）”及其实践形式——综合集成研讨厅是人民科学家钱学森在创建系统学方面的重要贡献。20世纪80年代以来，中国航天710所致力于将系统工程理论方法应用到社会经济领域，研究人口系统、经济系统以及可持续发展中的复杂系统问题，不断探索综合集成方法的实践之路。

一、从航天系统工程到社会系统工程

系统工程来源于实践，它首先是在航天领域发展起来的。航天型号系统是集众多高新技术于一体的复杂产品，具有高度系统性、复杂性和严密性，其研制、生产和发射等过程涉及众多专业领域和部门，需要多方专家、技术人员、管理人员、制造人员和服务保障人员的共同协作。我国早在上世纪五、六十年代，在钱学森同志的倡导下，航天工程系统率先开始了系统工程实践。航天系统工程方法是建立在先进的科学技术基础上的组织管理系统研制开发的方法，其主要目标和任务就是从系统需求出发，进行多专业综合和多学科协调，通过分析、综合、试验和评价的反复迭代过程，开发出满足全寿命周期使用要求、总体优化的系统。航天系统工程方法其精髓在于系统设计、总体优化、系统协调、跨学科合作和跨部门协作，在中国航天工程的实践中，型号总体设计部则是承担总体设计与协调任务的重要实体。航天系统工程技术与实践成为系统科学发展的工程技术层次的重要基础。

自20世纪70年代末开始，钱学森同志将现代科学技术的理论和技术发展与实践应用紧密结合起来，探索系统科学理论，提出了系统论方法。1978年在《文汇报》上发表了《组织管理的技术——系统工程》一文，公开、广泛地宣传系统工程这门科学技术，倡导将系统工程应用到复杂的社会经济系统中去。

20世纪80年代初，航天710所组建后，即开始将控制论与系统工程应用于人口与社会经济系统研究。这一时期，根据当时国家经济改革和宏观决策的需要，进行了“人口系统定量研究及其应用”、“中国宏观经济政策模拟和经济形势预测”、“财政补贴、价格、工资系统研究”、“中国农业模型及粮食生产预测”、“中国技术进步与产业结构研究”等重大问题研究，这些研究得到了钱学森、宋健以及经济学家马宾等的

指导和大力支持。面对这些复杂系统问题，仅靠传统的定性分析与判断难以解决，在实践中，经济学家、管理专家与系统工程专家结合起来寻求解决问题的途径。其中一个典型的案例是1983—1985年间完成的“财政补贴、价格、工资系统研究”[1]，这一研究的过程如图1所示，该问题是国家经济改革中需要解决的实际问题，在改革开放初期，农副产品收购提价和超购加价政策引起的国家财政补贴逐渐成为中央财政赤字的主要根源，必须进行政策调整。有关部门提出通过调整零售商品价格以减少财政补贴的建议，但提高零售商品价格又必须同时提高职工工资以防止居民生活水平大幅度下降。这涉及到财政负担能力、市场平衡、货币发行以及银行储蓄等等，可见，财政补贴和价格调整的幅度这样一个看似简单的数量问题，实际上是一个影响到经济系统整体运行的系统性问题，仅靠定性判断或简单定量计算难以解决。因此，在马宾同志的具体指导下，尝试采用系统工程方法研究这一问题。经济学家、管理专家和系统工程人员等来自不同领域的研究者紧密结合，从决策需求出发，进行研究和讨论，辨识与明确问题，综合运用理论方法和经验知识，通过系统建模、政策模拟和寻优，进行定量分析与测算，共同分析定量结果，反复比较和验证，最终选择5种方案作为政策建议上报政府，成为决策的依据。这一阶段这些具有实践意义的工作，与军事领域、社会系统、地理系统等领域中的一些成功案例一起，成为综合集成方法提出的实际背景之一。

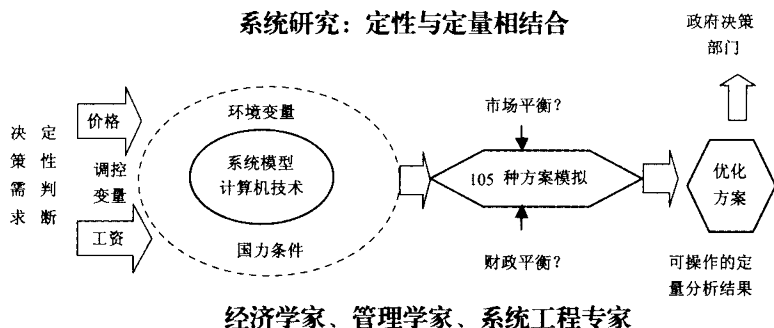


图1 “财政补贴、价格、工资系统研究”研究过程示意图

20世纪80年代，钱学森亲自倡导和指导了在710所举行的“系统学讨论班”学术活动，在研讨班上，来自国内众多单位的学者们，对系统科学及其相关的各学科理论及其最新进展进行了广泛而深入的报告与研讨，在讨论班上，钱学森发表了许多创造性观点和思想方法[1]，20世纪80年代末，在理论研讨和实践总结的基础上，钱学森提出了研究复杂系统的方法论——综合集成方法，90年代初，随着现代信息技术的进一步发展，进一步提出了综合集成方法的实践形式——从定性到定量综合集成研讨厅及研讨厅体系，并将运用这一方法的部门称为总体部[2]。综合集成方法的

实质是把专家体系、信息与知识体系以及计算机体系有机结合起来，构成一个高度智能化的人机结合体系，这个体系具有综合优势、整体优势和智能优势；从运用和应用层次上看，则是以总体部为实体进行的综合集成工程。这样，这套方法又把系统工程从工程系统工程发展到了复杂系统工程，可以用来处理更加复杂的社会系统中的组织管理问题[3]。

二、综合集成方法的实践与探索

在钱学森提出综合集成方法后，710所开始自觉地以综合集成方法指导研究工作，面向应用，学习、实践综合集成方法，在宏观经济分析与重大政策模拟仿真、区域经济发展规划、人口社会经济可持续发展以及航天和国防科技工业发展决策等方面研究中，将领域理论和知识、系统学方法、计算机体系与专家知识与经验等有机结合起来，发挥交叉科学的优势以解决复杂性问题。

其中，人口、社会经济和资源环境可持续发展作为多学科交叉的重要领域，是我们研究工作的重要方向之一，将人口发展与控制、宏观经济决策与规划等领域的工作和资源、环境发展相结合，对中国人口、经济、生态环境与发展进行系统研究，研究中国可持续发展理论体系及其发展模式、管理理论与政策等。在这些研究中，我们十分注重跨学科、跨领域研究者以及实际管理专家的协作、理论与实际应用的紧密结合以及计算机技术的应用。例如，宏观经济水资源规划所要解决的是水利工程建设、水资源开发利用与社会经济长期协调发展的问题。水资源供给是经济发展的约束条件，经济发展产生的水需求是水利工程和水资源开发利用的动力，工程建设受资源条件和投资规模约束，而经济发展水平又决定工程投资能力，这是一个环环相扣的过程，同时，在进行区域经济发展规划必须考虑不同分区子系统的经济发展的协调、区域间资源优化配置，以最终实现总体优化。710所与水利部水资源所以及相关省市水利部门相结合进行研究和应用实践，形成了一套研究水资源系统和经济系统协调发展的有效方法和计算机支持体系，先后应用在华北、新疆北部水资源发展规划、南水北调工程等项目中，取得了良好的应用效益。

在运用综合集成方法指导实践的同时，我们也一直致力于探索综合集成方法及研讨厅体系的实现。结合宏观经济系统研究，1993—1996年，710所与中科院自动化所、华中理工大学联合承担了国家科委"863"高科技计划重点项目"综合集成的智能宏观经济决策支持系统(MEIDSS)"，尝试构建人机结合的综合集成体系，探索综合集成有关信息体系、模型体系、知识体系以及计算机工具，如可视建模系统、仿真决策集成环境、知识推理工具等以支持宏观经济决策。这一系统的开发，通过人机结合解决特定复杂系统问题方面的能力得到增强。

实践的历程，也是对综合集成方法的认识逐渐深入的过程。在20世纪80年

代，开始尝试通过跨领域专家协作并发挥计算机的定量运算能力来解决复杂社会经济系统问题，计算机仅是定量分析的工具；90年代初，通过MEIDSS项目探索建立人机结合的综合集成系统，但限于当时的认识、实践水平与信息技术水平，这一项目中所构建的系统，更为强调加强机器的智能，与人机结合、人网结合、以人为主的综合集成的研讨厅体系相比，还存在较大距离。

90年代后期以来，我们进一步认识到，综合集成方法的运用，是专家体系的合作以及专家体系与机器体系合作的研究方式与工作方式，并通过"定性综合集成"到"定性、定量相结合综合集成"再到"从定性到定量综合集成"三个步骤来实现[4]，这个过程是循环往复、逐次逼近的。根据这一工作方式，研讨厅与研讨厅体系，实际上是人机结合、以人为主的信息处理系统、知识生产系统、智慧集成系统。

基于这一认识，1999—2004年，710所与中科院自动化所、系统所等多家研究单位合作，建议并承担了国家自然科学基金重大项目"支持宏观经济决策的人机结合综合集成体系研究"。此项工作，旨在以宏观经济系统为研究对象，以应用为导向，采用先进的信息、网络技术，探索与实现综合集成研讨厅系统，将研讨厅体系的理论框架具体化。项目集中探讨了综合集成方法的实现过程、人机结合的研讨环境构建、支持宏观经济决策的系统研究框架、知识体系构建与知识发现过程、思维模式以及各种方法与工具等，并面向应用进行宏观经济决策支持研究等工作。

三、"支持宏观经济决策的综合集成研讨体系"研究和思考

（一）综合集成研讨厅的构建目标及综合集成过程实现

综合集成研讨厅是面向复杂系统研究的实践方式。在现代信息技术支持下，综合集成研讨厅的目标是构建一个能把专家体系、信息与知识体系以及计算机体系有机结合起来的高度智能化的人机结合体系，能把人的思维、思维的成果、人的经验、知识、智慧以及各种情报、资料和信息集成起来，系统地研究问题，从多方面的定性认识上升到定量认识，实现知识创新[1]。

专家研讨会是专家意见交流和智慧碰撞的有效途径，也是研讨厅思想的重要来源。但是，综合集成研讨厅与现实的专家研讨会的本质性区别在于，通过研讨厅提供的意见综合与集成的知识环境、方法与工具，研讨厅为专家群体提供了一个共同工作和意见综合的平台，而不仅仅是意见交流的场所。传统的专家研讨会在问题研究和决策支持方面有很大的局限性。以经济分析研讨会为例，现实的经济分析研讨会包括意见发布和交流会、小型专家研讨会以及有关决策部门组织的、针对具体决策问题的研讨会等类别，前文所述的财政补贴问题的研究过程中的专家研讨会可以

归入这一类。前两类研讨会上，专家们可能发布相似或争议性的结论，却往往缺乏共同讨论的基础，其经济政策建议必然是零散的，互相间难以具有借鉴意义。意见分歧产生于占有信息不全、片面理解经济现实、过分以某一理论做指导等，并与研究者的专业与特长有关。这样的研讨会难以成为决策的依据；而第三类研讨会，也存在局部性、临时性、零散性等局限[5]。

综合集成研讨厅基于复杂系统领域知识构建，针对问题进行研讨和求解，根据不同的问题组织相应的跨学科专家参与研究；研讨厅提供丰富的领域知识和相关信息，这些信息与知识来源广泛，动态变化，通过资源共享，弥补各自信息与数据的不足，统一的信息基础使得比较分析成为可能；研讨厅环境设计和提供的工具立足于从技术条件和思维模式等方面为专家相互沟通提供有效的辅助支持，为从不同理念出发的专家提供了意见碰撞和博弈的机会。就特定的问题，专家们可以交流各自的看法，相互启发，相互辩驳，这种辩驳不再仅仅是定性意义上的，而是可以通过各种定量手段加以论证。研讨厅提供的各类模型和定量分析方法、工具，为专家们共同拟订方案、定量分析和验证方案提供了条件，通过定性分析与定量模拟的结合，避免了一般性讨论中由于出发点不同、占有的数据与信息不同、采用的分析工具与手段不同而无法比较、无法相互说服的局面。进而，研讨厅的重要特点是具有整体性和延续性。以复杂系统为对象，研讨厅的功能设计并不局限于一个具体的问题，而是针对复杂系统进行整体设计，为该领域的问题提供不断丰富的资源与支持手段，并进行长期跟踪研究。

研讨厅中的综合集成由局部意见集成和整体综合集成两种途径构成，从定性到定量的综合集成是通过针对问题求解的整体研讨过程而实现的。就具体问题而言，从局部上看，研讨的过程是一个意见综合的过程，从整体上看，则是局部意见的综合集成、问题求解的过程。不同层次的定性与定量综合集成可采用多种方法和工具，如局部意见综合方法可采用智暴、名义小组法、AHP、德尔菲法及其他多种群决策方法等。从整体上看，则是一个专家意见沟通与协作，通过系统辨识发现问题，进而通过研讨分析识别和界定问题，利用各种资源与手段寻求解决方案，进行定量解析与论证，最后达成一定的共识或形成一定的解决方案的整体综合集成过程。在问题研讨的各个环节，研讨体系可通过多种方式搜集、组织与提供丰富的基于领域知识与综合集成方法的各类资源，包括信息、模型、案例、方法和工具以及决策知识等。

总之，综合集成研讨厅为专家体系提供一个人机协作、专家体系合作的协同工作平台，将广泛分布的、丰富的领域信息、知识、模型、方法工具等资源组织加工成为一个整体，针对研究对象系统提供开放的、动态的整体研究环境，构成有效的分析基础。在此基础上，运用研讨厅体系提供的意见综合与集成的环境、方法与工具，通过专家体系的沟通、博弈、协作等，实现从定性到定量的综合集成过程，将专家的个体智慧上升为群体智慧，形成一定的科学结论。

（二）研讨厅知识体系构建与知识发现

研讨厅的效用体现在它运用知识、创造知识的能力。复杂系统存在巨量且不断发展的跨学科知识，研制开发针对复杂系统的研讨厅体系，其本质上要求与研究的对象系统紧密结合起来。从这一角度看，研讨厅中的知识体系由两大部分组成：普适性知识体系和对象系统知识体系。

普适性知识体系包括人-机结合技术、知识开发环境、群体研讨、意见集成、知识表达与知识发现技术、通用问题求解过程和方法、通用决策方法等等，普适性知识体系对不同的研讨厅具有通用性，提供多样化方法与工具应用来引导、帮助专家讨论和思考，形成一个支持群体思考与群体决策的环境。

普适性知识体系可以提供良好有效的意见处理和整合工具，对于构建支持知识创造的研讨厅环境是不可或缺的，与此同时，由于研讨厅的构建目标是专家共同工作的环境而非一个简单的讨论平台，对于复杂系统而言，问题求解的一般性方法必须和领域特定的方法与知识体系结合起来，强大的领域知识支持是研讨厅有效性的重要保证。对象知识体系包括数据、信息、对象系统的专门理论和方法、系统模型、实践案例，特定的问题求解方法、工具以及决策方法、工具等。

复杂系统的知识体系是多维、多层和多面的，并且是广泛分布和动态发展的。这一知识体系包括结构化和非结构化知识、显性和隐性知识，感性和理性知识等等，同时，各类方法与工具往往具有不同的应用目标和约束条件。对对象系统的系统研究是构建这样一个知识体系的出发点，这些研究包括系统描述，系统状态和内外部环境分析，系统调控研究以及决策者、专家在调控中的作用等等，这是一个从整体到局部的过程；与此同时，研讨厅体系的一个重要特征是知识的积累与创新，在整体框架下，随着对象系统自身、对象系统知识体系、研讨厅自身的方法体系、研讨厅中问题求解过程、案例与知识体系的积累与改进而不断丰富、发展，这又是一个从局部到整体的过程。

研讨厅知识体系构建也是一个将隐性知识显性化、显性知识关联化、系统化和可视化的过程。研讨厅中知识体系的形成过程示如图 2 和图 3[6]：1. 信息知识化。通过信息获取、过滤、开发等过程，将广泛分布的、不断增长的信息组织成知识。方法和工具包括基于网络的信息搜索与信息推荐[7]、知识挖掘等；2. 知识网络化。不同来源、不同目的和不同利用方式的各类知识构成一个复杂的知识网络，在研讨厅中通过问题求解过程的分析与应用，将孤立的知识关联起来；3. 专家智慧的涌现与表达。通过研讨环境、支持方法与工具，以及从定性到定量的整体研讨过程，促进知识创造过程。这些方法与工具可包括专家交流的可视化环境和方法，如电子公共大脑（ECB）[8]，创造力支持系统（GAE）[9]等；意见综合与集成工具；通用问题求解工具与方法；思维过程记录与模拟如案例推理系统（CBR）等。

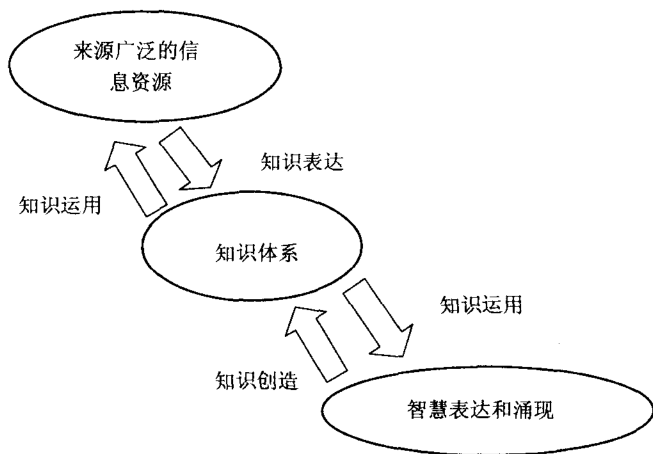


图 2　知识体系形成

案例推理在定义和运用经验知识方面的有效性,使其成为与知识重用有关的领域内的重要工具。对于研讨厅体系而言,可以有三类案例:一为针对某一特定问题的实际案例,二为专家研讨案例,三为专家个人案例。历史案例是未来决策的参考,尤其是那些已经为实践所检验的决策案例;专家研讨案例则有益于群体学习和相互借鉴。显然,研讨支持案例系统有助于促进研讨厅知识体系的发展。

（三）从宏观经济决策支持角度研究综合集成研讨体系

综合集成研讨厅的有效性与对象系统知识的运用密切相关,综合集成过程是在人机结合、以人为主的工作模式下通过系统知识与专家经验的整体运用过程而实现的。基于上述理解,由 710 所、华中科技大学和中国人民大学等单位共同承担的上述基金重大项目的第二子题,研究的基本出发点确定为基于宏观经济系统分析与宏观经济决策过程,探索综合集成研讨体系的实现,图 4 为研究的基本框架。

从图 4 中可见,综合集成方法是本项目的重要支撑,并通过项目研究不断探讨从定性到定量综合集成方法的具体实现途径。项目研究将宏观经济系统分析与基于宏观经济的综合集成研讨过程实现等两方面有机结合起来,构建综合集成研讨厅中宏观经济系统知识体系框架,并面向应用进行宏观经济决策支持研究。

宏观经济系统研究是研讨厅中知识体系构造的基础,是项目研究的两大重心之一。从系统科学的角度出发,将经济系统作为一个开放的复杂巨系统,分析宏观经济系统结构、状态、功能与系统环境,从多侧面研究系统描述与系统调控问题,根据宏观经济系统调控和决策的特定需要,建立支持宏观经济决策问题研讨的宏观经济系统研究框架,进而围绕该框架,形成宏观经济数据与信息体系、指标体系、模型体

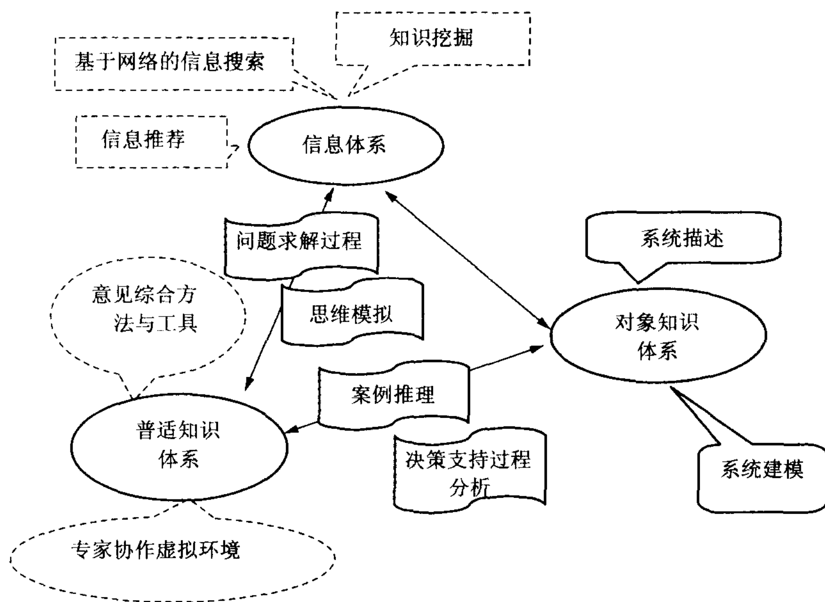


图 3　知识体系构造中的方法与任务

系、调控体系和案例体系等。其中，经济信息体系主要描述经济行为属性及其有关对象特征，经济指标体系是则从系统观测、控制、评价等不同角度描述经济系统内部存在的现象、复杂层次结构及其相互关系。模型体系则是基于一定的经济理论对现实经济系统的抽象的模拟反映，着重分析经济变量之间的整体结构和相互关系。

案例推理与案例体系研究是项目的重点之一，基于复杂系统问题求解过程中实践案例与专家经验的重要性，项目中对案例推理方法、智能化案例推理技术及其在复杂系统仿真中的应用进行了深入研究，以人-机结合的综合集成群决策研讨体系为应用背景，开发了基于案例的金融危机预警软件原型系统（CBRFCPSS）[10]并进行了应用验证。实际的宏观经济调控政策与实践也是案例的重要来源。

项目的另一重心是综合集成研讨厅中宏观经济问题求解的实现过程，研究研讨厅的运行机制、综合集成研讨环境中宏观经济决策问题研讨模式、研讨流程，与宏观经济决策相关的知识、资源以及研讨过程中宏观经济系统知识的组织和应用方式等，形成开放式研讨框架，并结合宏观经济实际问题，与其他项目组一起共同进行综合集成研讨的案例研究与实验、方法验证和应用研究。

在研讨厅中，综合集成过程从一定意义上说是系统模型的应用过程和模型的应用集成过程，因此，系统模型体系及其应用是研究的重点之一，其体系框架如图 5 所示。宏观经济模型体系按照其建模手段可以分为基于数据、基于机理、基于规则和基于案例等四大类模型，各类模型可针对不同的分析对象、采用不同的方法构建。

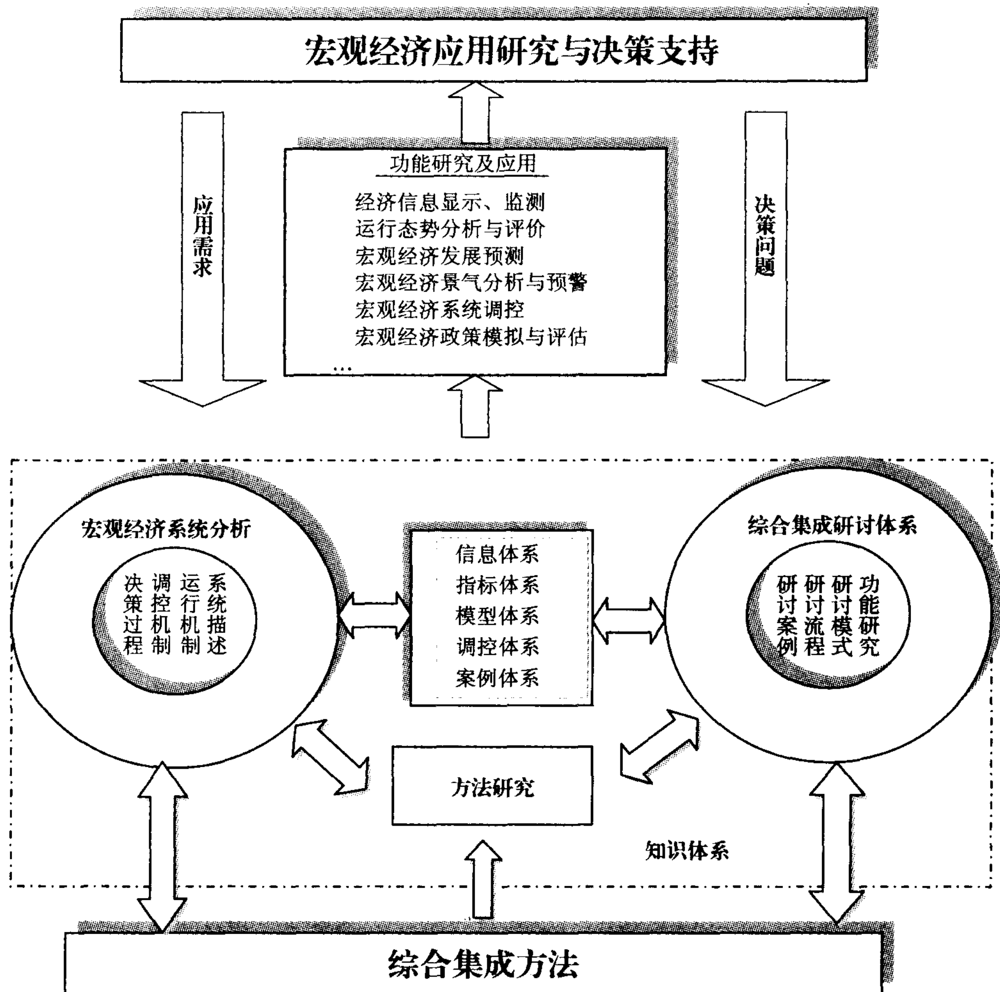


图 4　宏观经济系统分析与综合集成研讨研究框架

对复杂经济系统而言,完全靠一类数学模型来描述是很困难的,把数学模型、计算机模型等结合起来的系统模型,则可能更为逼近实际系统,有利于解决实际问题[4]。根据经济系统及宏观经济决策问题的复杂性特点,宏观经济模型体系必须是开放的,并体现整体性、互补性、动态性和分布性等特征。因此,我们从宏观、中观、微观相结合的思路出发,研究综合集成模型体系的特点及其应用集成模式,构造不同功能、不同方法、适用不同对象的多维模型体系,短期模型与长期模型相结合,预测、预警、评价、规划、机理分析与政策模拟等不同功能的模型相结合,对同一问题可以有多种模型支持,同一模型也可应用于解决不同的相关问题。同时,以多个宏观经济

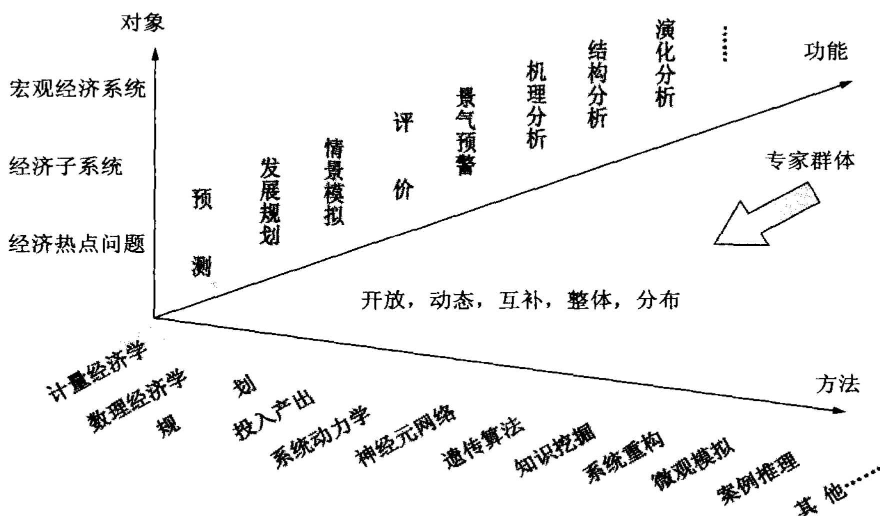


图 5　综合集成的宏观经济模型体系结构

现象为研究对象，构建基于主体的演化模型[11]，模拟分析微观主体行为对宏观经济的影响。

研讨厅中从定性到定量综合集成的实现过程，通过选择典型的宏观经济决策问题，进行问题求解过程分析、研讨模版设计与应用验证来体现。以“宏观经济政策分析与模拟”为例，这一问题一般可包括八个步骤：形势分析、景气评价、问题研讨与辨识、对策分析与政策选择、情景分析与方案设置、政策模拟、结果评价和调控模式确定等。研讨厅环境下，丰富的信息、模型、案例和方法工具在研讨过程中得到应用，各类具有不同功能、描述复杂系统不同侧面的模型，如评价模型、景气模型、预测与模拟模型、案例分析模型等，在问题求解的不同阶段，通过互补和互证性应用来描述、分析和验证专家判断，进行模拟仿真。这样一个问题分析过程，在现实中专家个体或小组进行研究时，可能只有一两种方法、模型被使用，而在研讨环境下，丰富的研讨资源、方法和手段大大拓展了专家的定性与定量分析能力，使得专家获得更为整体和综合的视点，体现了典型的从定性到定量的综合集成过程。

回顾综合集成方法的实践历程，我们始终遵循理论与实际结合的道路、始终面向应用来探讨综合集成方法和研讨体系。实践证明，综合集成方法是处理社会经济等复杂系统问题的有效方法，而综合集成研讨厅的构建过程本身是一个在运用和实践中发展的过程。展望未来，将综合集成方法和综合集成研讨厅这一开创性的思想付诸实践，依然任重道远。

参 考 文 献

[1] 于景元、涂元季:从定性到定量综合集成方法——案例研究,《系统工程理论与实践》,Vol. 22,No. 5,2002

[2] 钱学森:《创建系统学》,山西科学技术出版社,2001 年

[3] 于景元,周晓纪:从综合集成思想到综合集成实践,《管理学报》,第 2 卷第 1 期,2005 年

[4] 于景元,周晓纪:综合集成方法与总体设计部,《复杂系统与复杂性科学》,No. 1,2004 年

[5] Zhou Xiaoji, HWMSE Approach for Macro-economic Forecast and Adjustment Issues, Knowledge and Systems Sciences: Towards Meta-Synthetic Support for Decision Making, Global-Link Publisher Hongkong, 2003

[6] YU jingyuan, Zhou Xiaoji, Feng Shan, Man-machine Collaborated Knowledge Creation In HWMSE, JOURNAL OF SYSTEMS SCIENCE AND SYSTEMS ENGINEERING, Vol. 14, No. 4, 2005

[7] 李耀东、崔霞、戴汝为:"综合集成研讨厅的理论框架、设计与实现",《复杂系统与复杂性科学》,No. 1,2004 年

[8] 程少川、张鹏柱:电子公共大脑设计的信息组织研究,西安交通学报(社会科学版),2001, 21 (1)

[9] 刘怡君、唐锡晋:一种支持协作与知识创造的"场",《管理科学与系统科学新进展》(宋学锋等主编),中国矿业大学出版社,2003 年

[10] Zhou, Kaibo, Shan Feng, Ying Wei, "Case-based Reasoning for Financial Crises Predicting System", *Journal of System Science and Information*, Vol. 1 No. 1, 2003

[11] 陈禹:复杂性研究的新动向—基于主体的建模,《系统辩证法学报》,2003. 1

钱学森系统工程的战略思考与科学实践

柴本良[1]　赵少奎[2]

1 总装备部国防科技信息中心，北京，100036；

2 第二炮兵装备研究院，北京，100085

一、引　言

20 世纪中叶，系统工程的理论、方法在世界范围内蓬勃发展，在现代工程与经济等领域，特别是军事工程领域相继得到广泛应用，取得喜人的成果。1955 年钱学森回国后，在开创我国导弹与航天事业的同时，登高望远，深刻地认识到系统科学的理论、方法对我国工程科学技术和社会主义建设事业具有特殊的重要性，并在创建我国导弹与航天工程的关键时期，结合我国实际，大力开拓、发展系统工程，指导我国国防科研部门的科技人员结合国防工程的开发，深入探索、研究，并运用系统工程的理论、方法，取得了诸多重大自主和原始性创新成果。

笔者先后于 1957 年和 1964 年初参加我国国防科研科技信息与总体设计单位的工作，亲身参与了我国国防高科技事业的初创、成长和大发展时期的工作，并有幸亲身聆听钱老在我国国防高科技事业发展的不同阶段，关于我国高科技事业发展的许多重要指示和教导，钱老的身传言教，使笔者在几十年的科研工作中受益匪浅。

回顾钱老情系中华、高屋建瓴地对我国国防高科技事业深邃、精辟的战略思考，运用系统科学理论、方法运筹帷幄的科学实践，我们越来越深刻地认识到：钱老这些颇具远见卓识的战略思维与科学实践，不仅对当时我国国防高科技，乃至整个科技事业的发展产生了重大影响，而且对我国未来的社会主义建设仍然具有深远的指导意义。这里所述，主要是笔者亲身经历的几件事，从中可以深刻地感受到钱老对发展我国科技事业超前的科学意识，睿智的战略思维。

二、组织国家规模国防高科技工程，抢占科学技术的制高点，促进国家科技与经济事业的发展

新中国成立后，经过短短几年的经济恢复，1956 年 1 月，毛泽东同志就在最高国务会议上明确地提出："我国人民应该有一个远大的规划，要在几十年内，努力改变我国在经济和科学文化上的落后状况，迅速达到世界上的先进水平。"[1] 1956 年 2 月

27日，响应党中央的号召，钱老提交了《建立我国国防航空工业的意见书》。[2]该《意见书》对如何发展我国导弹航天技术，从组织、科研、设计、试验和生产等方面提出了组织国家规模高科技工程的总体思路和实施方案，很快得到党中央的肯定，同年10月国防部第五研究院正式成立，钱老任首任院长，全面负责我国导弹航天工程的实施。在党和国家正确政策的指导下，经过五院领导和全体员工的艰苦奋斗，仅仅10多年时间就组建了学科专业齐全、研制、生产、试验工作配套的导弹航天产业体系，走过了我国导弹航天事业从仿制到自行研制，既艰辛又光辉的历程，成功地研制了近、中、远程多种型号导弹武器系统和航天器。我国导弹航天计划的实施，有力地带动了我国相关科学技术和制造工艺技术的提高，抢占了世界高科技发展的制高点，增强了我国的综合国力，使我国跻身于世界国防高科技发展国家的前列。今天，回顾我国导弹航天事业的光辉历程时，我们更加深刻地认识到钱老关于组织国家规模国防高科技发展计划战略思考和实践的重大意义。

钱老组织国家规模国防高科技发展计划的真知灼见，是建筑在他长期从事现代科学与工程技术前沿探索与实践的基础之上的。[3,4]1936年秋，钱学森师从世界著名航空工程和力学大师冯·卡门，1939年取得航空与数学双博士学位，进而在当时科学技术前沿课题攻关的过程中，迅速崭露头角，成长为“现代科学”攻关的高手。上个世纪40年代，他曾经是美国著名的加州喷气推进实验室第一任主任，同时兼任哥达德航空中心的讲座教授，亲自参与了美国空军制订的著名的“飞向新高度”规划的科学实践，直接起草了规划的重要部分，逐步形成了他独特的系统工程理论基础和实践经验。在推进工程科学体系创立的过程中，他充分地认识到“纯科学的发现与工业应用之间的距离已经很短，留长发的纯科学家与理短发的工程师之间的差别也非常之小，他们之间的紧密合作需求产生了一种新的职业，就是工程科学家，他们在纯科学与工程之间架起了桥梁，运用基础知识解决工程的实际问题。”[5]并且认同“我们已从大规模生产的时代发展到工程的时代”，“各种科学学科，似乎互不相关……会以一种意想不到的方式彼此影响与促进，这种复杂的相互影响是科学和技术的生命和灵魂，自然的奥秘和财富往往隐藏在最微妙和最意想不到的地方。”[6]钱老身处在当时高科技发展的风头浪尖之中，通过亲身的科学实践，对现代科学知识体系和工程开发管理问题进行了新的思考，提炼出发展当代科学技术的真知灼见。因此，在20世纪70年代末，国家实行改革开放政策，我国科技事业迎来了又一个春天的时候，针对如何快速、有效地推进我国科技事业的发展，钱老通过笔者（柴本良）所在单位，要求笔者进一步撰写《组织国家规模的现代科技工程》，介绍国外如何组织国家级高科技工程的做法和经验教训，经过钱老过目修订后在中国国防科技信息中心的刊物上发表，在社会上引起了广泛的影响。

当小平同志明确指出：“科学技术是第一生产力”时，钱老进一步就我国社会主义建设事业发展的战略措施明确指出：21世纪的发展，不是以工业促进科学技术，

而是反过来，以科学技术促进工业发展。并进一步指出："要解决这个问题必须国家下决心，而且不能像现在这样分头去干。像大规模集成电路，要专门有一个公司，公司要设一个谋划全局的总体部……过去我们有搞'两弹一星'的经验"，"只要中国狠抓科学技术，一下子就跨入 21 世纪……我今天提出的战略不是以工业促进科学技术，而是反过来，以科学技术促进工业发展"[7]。

在半个多世纪的时间里，在不同的历史发展阶段，钱老一而再，再而三地提出要组织国家规模的现代科学技术工程，以此抢占世界科技发展的制高点，全面推进国家社会与经济的发展，充分反映出钱老对现代科学技术发展规律的深刻认识和钱老的科学发展观，他的这种战略思考，直接推动了我国国防高科技武器装备发展的历史进程，而且必将会深刻地影响着我国新一轮技术革命向新的产业革命发展的进程。

三、系统工程是当代产业革命进程中组织管理技术创新的源泉

20 世纪中期，工业发达国家在相继出现的计算机技术、航天与核技术，以及通信技术的推动下，武器装备发展出现了划时代的变革。在高新技术武器装备的研究、开发、试验与生产过程中，出现了前所未有的工程开发组织管理的理论和方法，孕育了工程系统工程的诞生。

20 世纪 50 年代初期，系统工程只是在美国等工业发达国家的少数高新技术研制单位开始研究和探索。1948 年，钱学森就发表了"工程与工程科学"的论文，明确地指出[5]："当代，科学与技术研究已经不再是没有计划的个人活动，任何一个大国的政府都已经认识到，这种研究是增强国力和国民福利的关键所在，因此，必须严密地加以组织。"并且在美国火箭、导弹研究的开创时期，钱老就极富远见地提出"火箭导弹技术同其他类型的武器所要求的技术完全不同，必须委托给军事部门的一个新的团体，要用新的军事思想和思想方法进行研究……"并且建议美国应成立一个"喷气武器部"[8]，统一组织领导火箭导弹技术的发展工作。1954 年，他在完成《工程控制论》[9]的过程中，又进一步形成了很有创意的系统思想，在"复杂性科学"研究的重要分支——《控制论》研究中作出了开创性的贡献，超前地建立了现代系统工程与系统科学的理念，使其跻身于世界系统科学早期研究者、开拓者之列。

20 世纪 50 年代，在刚刚诞生的新中国，系统工程更是很少有学者关心的领域。但是，当钱老主持我国导弹航天事业时，1956 年他就在国防部五院设置了"作战研究室"，开创性地推进了军事运筹学的研究与实践。记得在 1958 年，在北京永定路国防部五院二分院的一间办公室里，钱老亲自给国防部五院的干部和科技人员作美国军事运筹学发展的学术报告。笔者(柴本良)清楚地记得，钱老当时以二战期间美

军士兵在食堂排队洗碗过程中出现的碱水池与清水池设置问题为例，来说明怎样调配碱水池与清水池的配置，可以避免士兵洗碗排长队浪费时间的问题。他用极其生动的语言，简明的实例，深入浅出地向我们这些刚刚走上工作岗位的科技人员介绍了军事运筹学的基本原理和方法，使笔者至今记忆犹新，历历在目。

在创建我国导弹与航天工程研制体系之初，钱学森就明确指出："健全的航空工业，除了制造工厂之外，还应该有一个强大的为设计服务的研究及试验单位，应该有一个做长远及基本研究的单位"。[5]他当时就清醒地认识到：现代复杂工程系统的开发与传统工程研制有很大不同，组织管理工作必须符合科学技术工作的客观规律，也要结合中国的具体情况，应当建立具有宏观谋划与系统设计运筹、控制与管理职能的总体研究机构。按照钱老的这一思想，我国导弹、火箭与航天技术研究院陆续都建立起总体设计部、专业研究所和相关的试制、生产厂与配套的试验基地，形成了具有我国特色的导弹、航天工程组织管理体系，把钱老对我国导弹、航天工程发展的宏观谋划付诸组织实施。随着我国导弹研制工作的逐步展开，钱老十分重视在我国导弹与航天研制计划中，采用先进的组织管理技术和方法，推进我国高科技工程项目的实施。这一时期钱老特别重视研究美国大型武器装备系统组织管理技术的进展，为此，在钱老的指导下，笔者（柴本良）所在的中国国防科技信息中心先后印发了《工程技术管理资料汇集》、《国外工程技术管理资料》，以及《科学技术管理》等文集，专门登载以系统工程为核心的项目管理技术和方法，供国防部五院领导和机关制订体制、编制工作条例时参考。1964年，国家酝酿在国防部五院基础上组建导弹工业部，钱老亲自指示笔者（柴本良）所在单位将美国有关大型导弹研制计划中关于抓总机构的设置资料进一步整理，由钱老亲自审定后，提供五院和有关领导在论证和决策导弹总体部等体制设置问题时参考。

20世纪50～80年代初，钱老作为中国导弹、航天科技事业的首席科学家，负责这支队伍在极其困难的条件下开展现代尖端科学技术发展的组织管理工作，形成了颇具中国特色的航天系统工程思想和方法。钱老组织推行了包括"计划协调管理技术"和"总体设计部"等一系列行之有效的系统工程管理理念和技术，有效地加速了我国导弹航天事业的发展步伐，推进了具有中国特色的航天系统工程的建立和发展。[10]恩格斯早在一百年前曾说过："一个民族要想登科学的高峰，究竟是不能离开理论思维的"。[11]在开创我国航天科技事业的长征中，钱学森提出了一系列有创见的理论、技术，把理论创新、技术创新、体制创新和管理机制创新有机地结合起来。在周总理与聂荣臻元帅的直接领导，钱学森的现代工程科学理念的指导下，国防部五院（包括后来的七机部、航天部）领导集体明智、坚定、有效地强化了总体设计部在航天产品研制全过程、全局性谋划与全系统综合集成工作中的技术运筹、协调和管理机制；推进了两条指挥线分工明确、协调配合的组织管理机制；实施了航天产品发展"三步棋"的宏观谋划、航天型号研制"三阶段"的程序管理与航天产品开发的三个

层次分级决策管理的运行机制，并且大力推广了系统工程的理论和方法[10]，使我国用最少的投入、比西方发达国家短得多的周期，走向世界航天大国的道路，创造了人类科技发展的奇迹。在赞叹中国航天人取得辉煌成就的时候，我们应当从钱老创新我国航天系统工程理论和身体力行科学发展观的实践中吸取丰富的营养和智慧，把我国社会主义现代化建设事业一步一步地引导到科学发展的轨道上。

四、系统工程理论、方法在我国导弹航天工程实践中的应用

在我国第一代战略导弹的研制与试验过程中，特别是在我国首批洲际导弹全程试验近 10 年的准备与实施过程中，在钱老的身传言教和指导下，笔者(赵少奎)对系统工程的理论、方法边学习，边实践，受益良多。不仅开创性地完成了我国首批洲际导弹全程试验的一系列实施方案的总体设计、系统运筹和众多系统试验实施的技术协调工作，而且在航天工程实践的基础上完成了《工程系统工程导论》等著述[10、12、17、19、37、38]，结合我国国情，系统地提出了工程系统工程的理论和方法。下面主要谈一谈在钱老指导下实施的几个案例。

（一）我国首批洲际导弹全程试验目标与基本保障条件的制订

1980 年 5 月 18～20 日，我国向太平洋中部海域发射了 2 枚洲际弹道导弹，进行了我国首批洲际导弹的全程飞行试验，震动了世界。同年 5 月下旬，在运载火箭研究院的一次技术总结会议上，张镰斧院长言简意赅地指出[14]：“我们进行全程飞行试验，准备工作做了 10 多年，但是，究竟需不需要进行全程飞行试验，我们也争论了 10 多年，我看，全程试验打完了，我们的意见才真正统一起来……”那么，我们争论的焦点究竟在哪里呢？

1974 年 5 月，笔者(赵少奎)向军委 718 工程和国防科委领导汇报我国洲际导弹全程试验方案时，钱学森副主任明确指出[13、14]：“洲际导弹全程试验是我国建国以来规模最大的一次科学试验，具有重要政治、军事和科学意义，我们一定要组织好，做好各方面准备工作”。可是，为进行我国洲际导弹全程试验而开展的“七一八工程”却几经反复和波折，直到 1979 年初，在全程试验准备的关键时刻，国防科委领导听取运载火箭研究院关于全程试验工作汇报时，火箭研究院总体部总体室的某主管领导代表火箭研究院发言时，竟提出：“全程飞行试验是我国洲际导弹定型的充分条件，不是必要条件，可试可不试，我们立足通过国内试验完成定型工作。”一石激起千层浪，引起了激烈的争论。钱老在做总结发言时，从我国洲际导弹研制的全局出发，用十分平和，但是，非常坚定、有说服力的语言指出：“立足国内试验定型是我们的愿望，可以说是一个良好的愿望，但是，从我们现在国内试验、测量条件和精度分

析工作进展的实际情况看，我们还不具备这个条件，全程飞行试验仍然是我国洲际导弹定型试验的重要组成部分，所以，全程试验我们还是要做，而且要扎扎实实地做好一切准备工作”。实践表明：在我国当时的研制条件下，洲际导弹的全程试验不是“可试可不试”，而是通过全程试验的科学实践，进一步暴露了我们在运载火箭系统设计中存在的薄弱环节，有力地推进了我国洲际导弹的研制和定型工作。全程试验是从我国国情和导弹研制的全局出发，从总体上思考并解决问题的明智决策。

作为全程试验的主管总体设计单位，为了更好地统一各参试单位对进行洲际导弹全程试验总体目标和工作思路的认识，我们按照钱老提出的“总体设计部把系统作为若干分系统有机结合成的整体来设计，对每个分系统的技术要求都首先从实现整个系统技术协调的观点来考虑，总体设计部对研制过程中分系统与分系统之间的矛盾、分系统与系统之间的矛盾，都首先从总体协调的需要来选择解决方案，然后留给分系统研制单位或总体部自身去实施”的思想，[15]从我国洲际导弹研制的全局出发，进行了全程试验的目标分析和试验基本保障条件论证[14,16]。这一课题涉及到对国内特殊弹道飞行试验结果的深层次分析，在这些问题认识不一致的情况下，各分系统势必从局部和本单位的利益出发，不适当地强调本系统在全程试验准备工作的重要性，导致领导和领导机关在人力、物力、经费和计划安排上遇到棘手的决策问题。针对这些问题，我们学习了在钱老指导下汇编的《系统工程与科学管理》文集，参照哈罗德·兰德在二次大战期间帮助丘吉尔制订“英国空军部署方案”时进行的快速系统分析案例[14,17]，按照哈罗德·兰德的办法，用图1形象地说明了国内特殊弹道飞行试验的预期结果，明确地提出了对组织全程试验的指导性意见[14]：就技术工作而言，完成洲际导弹命中精度验证是全程飞行试验的主要目的；通过国内特殊弹道试验，弹头射程适应能力等性能已经基本达到考核目的，但是，试验发数尚少，应在全程飞行试验中进一步考核，这是全程飞行试验的第二位任务；通过国内特殊弹道飞行试验，证明运载火箭总体方案基本正确、各系统匹配、协调，对特殊弹道环境基本适应，但是，对弹上环境敏感的系统和设备，还有待在真实的弹道环境下进一步考核。将上述分析结果向火箭研究院、七机部和国防科工委的领导汇报后，统一了对我国首批洲际导弹全程试验目标与基本保障条件的认识，推进了全程试验准备工作的落实。

面对从陆地到海洋，从海洋到空中由全国20几个省市科研力量形成的庞大试验系统，实施计划如何落实，成为国防科委领导面临的一个棘手课题。1976年5月，我国首批远洋考察队返回广州，一上岸，当时主管全程试验组织实施工作的国防科委孙茂祥副参谋长就把笔者（赵少奎）叫到他的房间，了解考察情况，并且提出：“你讲一讲，咱们的全程试验究竟什么时间可以进行？”当时笔者很难具体地回答这一问题。但是，在钱老潜移默化下形成的系统工程思想，使笔者能够明确地指出：“现在的问题，首先要明确我国洲际导弹全程飞行试验的主要目标和试验准备的基本保障

条件序列，然后把全程试验前必须完成的工作，按照‘计划协调管理技术’的方法排出实施计划网络图来，那时就自然可以做出结论”。

批次	弹道 \ 试验项 \ 飞行段	主动段				自由飞行段		再入段			
		井下热发射	总体方案	主要性能		姿态控制系统	突防系统	力、热综合环境	引爆控制系统	核装置冷试	再入散布
				精度	射程						
零一批	射程关机低弹道		○○	✧✧	✧✧						
	速度关机低弹道		○○	✧✧	✧✧			☆☆	✧☆		○○
	卫星弹道		○○○ ○○○	✧✧ ✧✧ ✧✧	✧✧✧ ○○○						
零二批	速度关机低弹道		○○	✧✧	○○			☆☆	✧☆		☆☆
	射程关机高弹道	○○	○○	○○	○○	☆☆	○○				
	射程关机低弹道		○○	○✧	○✧						☆☆

☆—充分考核；○—基本考核；✧—部分考核

图1　全程试验前，国内特殊弹道飞行试验的预期结果

按照系统工程的方法，我们制订了我国洲际导弹全程飞行试验的主要目标和试验准备的基本保障条件[14,16]，为领导机关决策各分系统人力、物力、经费等安排的轻重缓急；处理试验系统准备过程中的优先保障序列和如何进行协调或弃取；如何制订全区最低发射条件的保障序列；综合全区发射窗口和安排全区各分系统联试、校飞与近海演练计划，以及统筹决策全程飞行试验计划等提供了基本依据，为落实全程飞行试验计划网络图提供了决策依据。

通过全程试验系统工程的实践，使我们深刻地认识到：一个宏大工程开发涉及的领域越多、系统越复杂、研制进度越紧张，越要求工程系统开发的总体设计部门，特别是主管总体设计师和项目总负责人要紧紧抓住工程开发的目标分析与基本保障条件分析工作。工程开发目标分析与基本保障条件分析是指导工程开发的出发点和基本依据，是工程实施全过程的指南。因此，对于工程系统开发的总体设计部门，特别是总设计师，应及时、准确地做好工程系统的目标分析与基本保障条件论证工作，为工程项目总负责人进行工程决策提供充分、正确的决策支持，这是系统开发组织管理的核心问题之一。

（二）弹着点测量"水柱雷达系统"方案的提出与实施

20世纪70年代，在我国首批洲际导弹全程试验的准备过程中，开展了海上测控系统的研制工作，命名为"七一八工程"。其中有一个十分重要的项目——"弹着点测量系统"，它的成功与否，在很大程度上关系到我国首批洲际导弹全程试验测控系统准备工作与实施的成败。但是，由于测控系统的负责人对"弹着点测量系统"研制的意义认识不足，没有结合我国的实际情况进行必要的技术创新，导致研制的水声测量系统遇到了难以克服的困难[14,18]。

在这种情况下，钱老常常讲的一段话："别人讲不清楚的问题，我们应当讲清楚，我们也能够讲清楚，因为中国人并不笨。"鼓起了我们的勇气，我们毅然决然地从试验系统工程的全局出发，跨越技术分工的界限，对洲际导弹全程试验弹着点测量方案进行了广泛调研，在海军海上打靶确定炮弹命中点思路的启发下，提出了前无古人的"船载弹着点水柱测量雷达"的应急技术方案。按照"向阳红五号"船的舰桥高度，利用通用的船用导航雷达进行了分析论证，得出的初步结论是：只要适当提高雷达转数和测量距离，就有可能实现洲际导弹全程试验弹着点的测量任务。但是，测控系统主管部门的专家持反对意见，明确表示这是不可能实现的。其理由是[14,18]：

（1）国外根本没有这种测量系统；

（2）我们的导弹弹头击水后会不会产生水柱、水柱有多高、能停留多长时间，谁能说清楚；

（3）即使方案可行，从研制雷达做起，时间也来不及。

在此之后的两年时间内，该方案被测控系统主管部门连续否定了三次。1978年初，当我们已经从AD报告中发现美国人正在进行同类弹着点测量系统的试验时，我们仍然对弹着点测量方案争执不下。当时的国防科委科技部四局李国枢局长面对只有一年的准备周期，果断决策[14,18]："你们总说别人提的方案不行，那你们拿出一个可行的方案啊！你们拿不出来，我看就按这个船载弹着点水柱测量雷达的技术方案做。"在这种情况下，才开始了"船载弹着点水柱测量雷达系统"的研制工作。

在钱老提倡的系统工程理论、方法的指导下，我们参照意大利军方应用系统工程的方法研制"茵地果"地空导弹系统的成功案例[14,19]，经过调研，很快提出了利用我国现有的打捞船、当时已投入使用的"船用导航定位系统"，改进海军现有的船用雷达，加上目标显示、记录系统，综合集成就形成了一个完整的应急弹着点测量方案，通过几个月的近海试验，很快就研制成功了急需的"船载弹着点水柱测量雷达系统"。主要依靠这一测量系统，我们可靠地获得了我国首批洲际导弹太平洋试验弹着点的精确测量数据，完成了我国洲际导弹全程试验弹着点测量的关键任务[20]。

（三）运用从定性到定量综合决策的办法解决海上试验区的划定问题

1. 问题的提出

1974 年 5 月，笔者（赵少奎）向军委 718 工程和国防科委领导汇报我国洲际导弹太平洋试验方案时，钱学森副主任明确指出[12]：“目前的试验方案基本可行，但是，导弹的海上试验区，一定要比美苏初期试验水平高，试验区要小；封锁时间要短。”钱老登高远望，明确地指明了我国首批洲际导弹全程试验技术准备工作的方向，但是，要完成这项任务却是一个很大的难题（试验区与试验禁区参见图 2～3）。

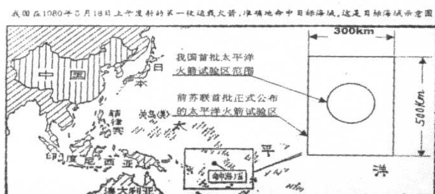


图 2　1980 年 5 月 9 日人民日报公告宣布的试验禁区



图 3　我国太平洋火箭试验区与测控系统布置图

2. 国外的做法

对于远程、洲际导弹的试验考核与鉴定，美苏都立足于在公海上进行全程试验。太平洋、大西洋几乎可以说是美国人的“内湖”，试验区的选择与划定自然没有什么约束；苏联在 1959 年进行首次太平洋导弹试验时，采取先斩后奏的办法，事先没有宣布，准备好了就打。以后苏联各批次太平洋导弹试验海上试验区如表 1 所示[21]。

表 1　苏联太平洋火箭试验各批次的海上禁区

批次	通告时间	结束时间	型　号	射　程（km）	发 数	范围大小（km）	说　　明
0			东方号火箭	12500	1～2		1959 年发射，射前未公告
1	60.1.8	60.2.2	东方号火箭	12500	2	500 * 300	苏联首次公开导弹试验，弹头落入试验区
2	60.6.29	60.7.8	新型多级火箭	13000	2	320 * 190	美国人两架巡逻机跟踪了试验，未看清弹头再入时是否损坏

（续表）

批次	通告时间	结束时间	型　号	射　程（km）	发 数	范围大小（km）	说　　明
3	61.9.11	61.10.30	改进型多级火箭	大于12000	8	290＊320	10月7日发射的火箭装有新型制导系统，可能是当时赫鲁晓夫吹嘘的“环球火箭”
4	62.10.16	62.10.18	新方案多级火箭	大于12000	2以上	210＊210 600＊300	首次使用两个试验区
5	63.5.12	63.7.11	改进型多级火箭	大于12000	4以上	320＊260	
6	63.11.29	64.1.24	改进型多级火箭		1以上	330＊310	
7	64.8.1	64.12.30	新型多级火箭		1以上	R120	首次使用圆形试验禁区
8	65.1.10	65.2.2	新型多级火箭	13000	1以上	R120	
…	……	……	……	……	……	……	……
31		75.6.7	SS—18	9200	2	R240	美国范登堡号测量船跟踪侦察，弹片落在范登堡号测量船上
…	……	……	……	……	……	……	……
37	77.12		潜地导弹	7400	4以上	～R90	从白海的潜艇上发射的潜地导弹

3. 还原论方法的困惑

当时我国还不具备在公海上进行全程试验的条件，按照当时的研制计划，到1979年底，我们可以进行6～8发国内特殊弹道的短程飞行试验，如何通过6～8发短程特殊弹道飞行试验，确定我国首批太平洋导弹的试验区？既要保障试验船队的安全，又不伤及试验禁区外的航空器和船只，还要确保试验区与禁区的划定比美苏初期试验水平高，对我国科技人员提出了挑战。

导弹射击总误差包括制导误差和非制导误差两部分，对于我国当时的洲际导弹

来讲，非制导误差所占比重很小，主要矛盾是搞清楚制导误差。制导误差中的方法误差所占比重也很小，因此，主要矛盾是搞清楚导弹的制导工具误差。

制导工具误差包括两部分：制导系统测速（加速表）误差与基准（陀螺）误差，参见图 4。

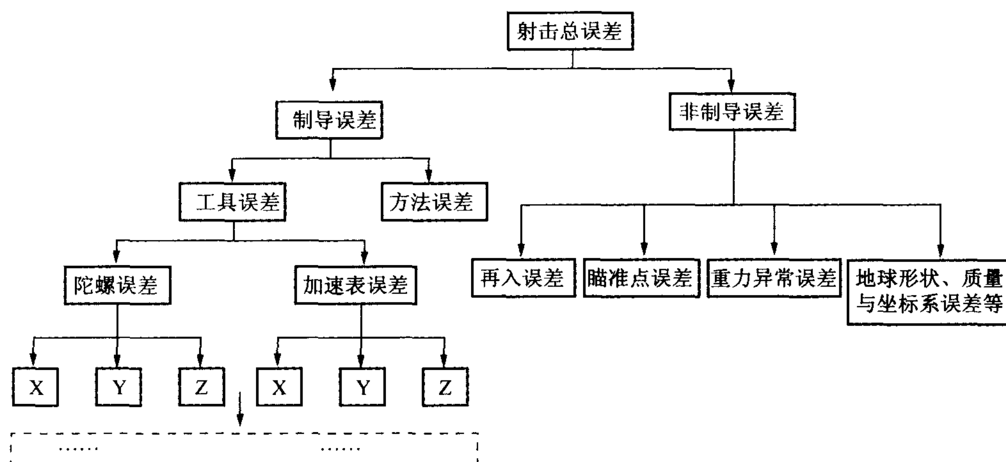


图 4　导弹射击总误差分解图

制导误差可以通过导弹飞行试验的遥、外测数据进行数学处理获取：

$$\Delta W = W_{YC} - W_{WC}$$

式中 W_{YC}——导弹飞行的遥测数据

W_{WC}——导弹飞行的外测数据

略去遥测的系统误差，外测的系统误差事先扣除或作为误差项进行分离，可以得到

$$\Delta W = \Delta W_{测速} + \Delta W_{基准} + \Delta\eta = W_{工具} + \eta$$

其中 η——遥测、外测系统的剩余随机误差

从理论上得到上述结果并不难，但是，实际上解决这一问题，遇到了难以克服的难题：

（1）由于我国测量系统研制滞后，当时的测量系统获得的测量数据的可靠性与精度都难以满足精度分析的要求；

（2）导弹制导误差分析方法有待试验验证，虽然当时提出了诸如贝叶斯法、岭估值法、超椭球法、主成分法、改进主成分法和特征根估计法等精度分析方法，但是，分析方法的可靠性仍然不能令人满意，特别是难以得到试验的可靠验证；

（3）即使到全程飞行试验之前，我们默认所有飞行试验的测量数据都能满足精度分析的要求，最多也只能获得 6～8 发特殊弹道数据，能够供精度分析用的信息仍

然是十分有限的。

因此,当时采用"还原论方法"指导下的精度分析方法解决这一工程问题时,我们遇到了难以克服的困难。

4. 从定性判断到定量综合分析决策

对于开发性科研工程,特别是前无古人的开发性科研工程,我们常常遇到研究对象原始信息十分不足的难题,采用还原论指导下的"简单性科学"方法常常遇到难以克服的困难。在客观条件的逼迫下,我们不得已采取扩大研究对象原始信息源的办法,把客观世界存在的所有相关信息都作为原始信息来处理,在广泛收集、分析相关信息的基础上,走一条从定性判断到定量综合决策的道路。

首先,收集了我国所有弹道导弹型号正常武器弹道飞行试验的实测数据,进行统计分析,得出东风型号导弹横向射击误差很小,而且多远弹的统计规律。考虑到我国东风型号导弹控制系统研制的继承性和设计方法的一致性,对我国洲际导弹命中精度的理论设计做出了基本的定量估计,对洲际导弹的弹头试验区做出了定性与基本定量判断。然后,通过理论计算与统计分析确定了导弹弹头与弹体落点的中心点距离 $L_{头体中心距}$,并且通过对洲际导弹国内特殊弹道飞行试验残骸的实际勘测,初步确定了我国洲际导弹弹体残骸的散布区[14,22](参见图 5)。

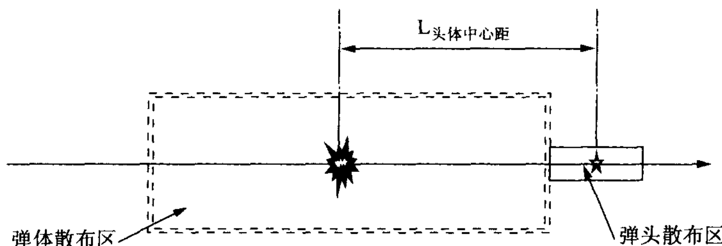


图 5　导弹头体散布区示意图

在此基础上,进行综合集成,形成我国首批洲际导弹全程试验的弹着点试验区与试验禁区的决策支持意见,给出了半径为 65～70 海里的试验禁区(参见图 2),被领导采纳,并付诸实施。

五、与时俱进,不断创新,开拓社会系统工程,拓展系统科学,推进科学发展观

早在 1977 年,国家正在着手筹备召开全国科学大会之际,国防科委办公厅王勉主任向国防科技信息中心传达了钱老等著名科学家积极推动发展系统工程的主张,

并提议把发展系统工程纳入国家科技发展纲要之中。按照钱老的指示，在其秘书王寿云同志的具体帮助下，笔者(柴本良)与陈宝庭、王芝仙等同志组织编辑了一批国外有关系统工程发展概况的资料，并于1978年底，出版了不定期的内部刊物——《系统工程与科学管理》。钱老十分重视刊物的编辑工作，亲自过问组稿、审稿等全过程。这是国内第一份专题刊载系统工程研究与实践的刊物，一经出版，立刻引起国内各方面的热烈反响。同时，钱老明确指出：系统工程与以计算机为核心的信息技术相结合，不仅能够应用于工程领域，在经济、军事、生态、环保等领域也有广泛的推广应用前景。这种跨部门、跨行业、跨学科的推广应用，必须运用社会系统工程的理论和方法，通过综合集成、协调发展的总体思路促进社会的和谐发展。钱老充分认识到社会系统工程的活力孕育在这种跨部门、跨行业、跨学科的交叉与协调发展之中，为此，钱老与许国志、宋健等同志多次研究讨论，十分关心系统工程在各行各业的统筹规划、协调发展问题，并且针对我国各行各业普遍存在的垂直领导、部门条块分割的不利环境条件，探讨与社会系统工程内在的系统性、综合性、和谐性等固有特性存在的矛盾和解决的对策，并且在全国范围内推行了一整套现实可行的应对措施，取得了明显的成效。

首先，1978年钱老、许国志与王寿云同志在文汇报联合发表了《组织管理的技术——系统工程》[23]；1979年，钱老、王寿云与柴本良共同撰写了《军事系统工程》[24]，1982年，在对国内外系统工程理论的现状进行了梳理和总结，澄清了学术界认识混乱的基础上，形成了独特的理论思路，出版了《论系统工程》一书[15]，创立了具有中国特色的系统工程理论体系。在此期间，钱老还在北京、成都、昆明、长沙等地举行了一系列系统工程讲座，运用社会媒体广泛开展系统工程的宣传，在全国范围内掀起了普及与推广系统工程的热潮。

第二，1979年10月11日，在钱老的推动下，我国第一个全国性的系统工程学术讨论会在北京召开，钱老亲自主持会议，并在开幕式上做了《大力开展系统工程，尽早建立系统工程的科学体系》的报告[25]。在钱老和国内众多知名科学家的大力推动下，1980年11月18日，中国系统工程学会正式获准成立。钱老进一步通过系统工程学会，组织、发动和协调全国各地、各部门的学术交流和系统工程的推广应用工作，对系统工程在我国跨部门、跨行业、跨学科的协调发展中发挥了重要作用。

第三，20世纪80年代以来，面对现代科学技术和现代经济社会越来越复杂化的迅猛发展形势，钱学森站在振兴国家科技事业发展与社会主义现代化建设事业全局的高度，在更加广阔的范围内，高屋建瓴地考察国际系统科学研究的发展态势，1986年，不失时机地带领我国一批相关领域的中青年科学家和有关学术领域的高层次学者组成了每周定期进行的“系统学讨论班”，开展了持续长达15年(钱老亲自参加6年)之久的系统学探索，明确地提出了创建系统学，落实科学发展观的任务，并且从

创建系统学走向复杂性科学研究，采用系统科学的观点和方法研究复杂性，结合中国的实际，寻求解决我国社会主义现代化建设的理论与方法，创立了具有世界广泛影响的系统科学的中国学派。

近20多年来，钱老不顾八、九十岁高龄，怀着情深切切的赤子之情，以其在科学技术领域中的崇高威望、扎实的马克思主义哲学功底、深厚的现代科学技术和中华传统文化的底蕴，向系统科学、思维科学、人体科学等前沿科学领域发起了跨世纪之战，取得了丰硕的成果，提出了现代科学技术体系结构[26]；社会主义建设体系结构[27]；系统科学的核心概念—开放的复杂巨系统[28]；“复杂性科学”是开放的复杂巨系统的动力学[29]，“凡现在不能用还原论处理的或不宜用还原论方法处理的问题，而要用或宜用新的科学方法处理的问题，都是复杂性问题”[30]的具有深刻内涵、可操作的“复杂性”定义；目前惟一能够有效处理复杂巨系统问题的一种方法论——从定性到定量综合集成方法[31]，探寻了一种进行复杂性问题研究与推进我国社会主义现代化建设事业科学决策现实可行的组织形式与运行机制——从定性到定量综合集成研讨厅体系[32]和总体设计部体系[33]，并且正在推进现代科学技术与马克思哲学、唯物辩证法与中国传统文化相结合的大成智慧学[34]……建立了结构完整的系统科学的理论框架。在马克思主义哲学的指导下，钱学森提出的一系列科学思想和科学方法论，是钱老探索与研究系统科学及整个现代科学技术体系在理论上的升华；是马克思主义哲学与现代科学技术、中国传统文化相结合，在现代交叉科学前沿领域综合集成的开创性成果；是解读和落实科学发展观“智慧的钥匙”，是钱老晚年在科学—哲学理论上的重大贡献。

六、结 束 语

20世纪80年代初，在钱老指导王寿云同志进行作战模拟研究的过程中，就明确地提出了“把科学理论、经验知识和专家的判断力相结合，通过半理论、半经验的方法处理复杂系统的决策问题”的总体思路。在创建“系统学”的过程中，提出了研究开放的复杂巨系统的方法论——“从定性到定量综合集成法”，把人的思维、思维的成果、人的经验、知识、智慧，以及各种情报、资料和信息系统集成起来，用结构化的方法逐步逼近非结构化的复杂系统决策问题，从多方面的定性认识逐步上升到能够实施决策的定量认识。1992年以来，钱学森院士进一步提出“从定性到定量综合集成研讨厅体系”的复杂系统决策运行机制的构想，开创了以人为主，人机结合、人网结合的新途径。

随着科学技术与现代社会的复杂化发展，系统科学将越来越显现出其强大的生命力和重大的科学价值，系统科学的理论、方法将成为推进我国社会主义现代化建设事业全面、协调、可持续发展的强大理论武器，成为全人类的宝贵财富。如果我们

在社会发展和军队装备建设发展战略、规划和计划研究与制订的过程中，运用这套理论和方法，建立一种社会发展和装备建设发展的新机制，将使我国经济社会发展和军事装备建设增添新的活力[35,36]。钱老的研究与实践把我们又带进了系统科学与复杂性科学探索、研究的大门，指引我们向世界科学技术发展的前沿继续奋进。

参 考 文 献

[1] 张钧主编:《当代中国的航天事业》，中国社会科学出版社，1986 年

[2] 谢光主编:《当代中国的国防科技事业》，中国社会科学出版社，1992 年

[3] 胡士弘:《钱学森》，中国青年出版社，1997 年

[4] 祁淑英、魏根发著:《钱学森》，花山文艺出版社，1998 年

[5] 郑敏哲:《钱学森手稿》，山西教育出版社，2000 年

[6] (美)弗雷蒙. E. 卡斯特、詹姆士. E. 罗森茨威格等(柴本良，华棣，李盛昌等译):《科学、技术与管理》. 国防工业出版社，1979 年

[7] 钱学森著:《创建系统学》，山西科学技术出版社，2001 年

[8] 王文华编著:《钱学森实录》，四川文艺出版社，2001 年

[9] 钱学森:《工程控制论》，戴汝为、何善榕译，科学出版社，1958 年

[10] 赵少奎:钱学森与航天系统工程，《钱学森科学贡献暨学术思想研讨会文集》，中国科学技术出版社，2001

[11] 马克思、恩格斯著:《马克思、恩格斯选集》第四卷，人民出版社，1995 年

[12] 赵少奎:十年前的太平洋火箭试验，《航天杂志》，1990 年第二期

[13] 赵少奎:飞向太平洋的洲际火箭，《航天杂志》增刊，1999 年

[14] 赵少奎:试验系统工程的初步尝试(——在 DF－5 全程飞行试验准备过程中，学习、运用系统工理论、方法的小结)，运载火箭研究院总体部，1982 年

[15] 钱学森等著:《论系统工程》，湖南科学技术出版社，1982 年

[16] 赵少奎:试验系统工程初探，《航空高技术与系统工程文集》，航空工业出版社，1994 年

[17] 哈罗德. 兰德:运筹学的起源，《系统工程与科学管理专集》，国防科委情报研究所，1978 年第一期

[18] 赵少奎、李世辉:从源头上保护原始性创新，《中国工程科学》第 5 卷第 11 期，2003 年

[19] 赵少奎、杨永太:工程系统工程导论，国防工业出版社，2000 年

[20] 谢光主编:《当代中国的国防科技事业》，当代中国出版社，1992 年

[21] 赵少奎:苏联在太平洋上的火箭与导弹试验，《靶场与试验技术》，国防科委情报研究所，1979 年第二期

[22] 赵少奎，弹道式导弹的试验区，《远方科技》，航天部 O 六六基地，1985 年第二期

[23] 钱学森，许国志，王寿云:《组织管理的技术—系统工程》，文汇报，1978. 9. 27

[24] 钱学森，王寿云，柴本良:军事系统工程.《系统工程与科学管理专集(三)》，国防科委情报资料研究所，1979 年

[25] 钱学森:大力开展系统工程，尽早建立系统工程的科学体系，《论系统工程》，湖南科学技术出

版社,1988 年
[26] 钱学森:现代科学技术的特点和体系结构,《论系统工程》,科学技术出版社,1988 年
[27] 钱学森:社会主义的协调发展需要社会主义政治文明建设,《创建系统学》,山西科学技术出版社,2001 年
[28] 钱学森、于景元、戴汝为:一个科学的新领域——开放的复杂巨系统及其方法论,《创建系统学》,山西科学技术出版社,2001 年
[29] 苗东升:钱学森复杂性研究述评,《西安交通大学学报》,2004 年(第 24 卷第 70 期)
[30] 王寿云、于景元、戴汝为等:《开放的复杂巨系统》,浙江科技出版社,1996 年
[31] 钱学森:再谈开放的复杂巨系统,《创建系统学》,山西科学技术出版社,2001 年
[32] 钱学森:《创建系统学》,山西科学技术出版社,2001 年
[33] 钱学森:社会主义建设的总体设计部,《创建系统学》,山西科学技术出版社,2001 年
[34] 钱学敏:钱学森关于复杂系统与大成智慧的理论,《西安交通大学学报》,2004 年(第 24 卷第 70 期)
[35] 赵少奎:现代化建设理论与决策管理机制的创新,《中国工程科学》,2002 年 8 月
[36] 赵少奎:工程系统开发复杂性的讨论,《中国工程科学》,2004 年 2 月

系统工程发展的新机遇

柳克俊
海军装备研究院，北京，100073

我有幸在钱学森院士领导下从事系统工程等工作，很受教诲，受益匪浅。在我国，系统工程已应用到许多领域，大到航天工程，如“神六”的成功发射。小到系统工程思想贯穿到我们工作和生活的方方面面，以至人们常说的“这也是个系统工程问题”。“系统工程”已是人们常用的词汇了。系统工程已取得了可喜的成绩，这是和钱老的贡献分不开的。

系统工程的性质已把系统工程工作者定位在：不仅要是个综合者、集成者、实践者和管理者，而且还要承担着为社会开发出更好系统的任务。显然，这是十分光荣而艰巨的。系统工程工作者既要是常说的 T 型或 TT 型人才，还要能变换角色，成为“图钉型”人才，既能解决问题，又能节约成本，更有不“喧宾夺主”的美德，能在重要场合发挥奇效，最后取得满意的整体效益，我国虽是人力资源大国，却是尖端人才小国，尤其缺乏系统工程人才。并在用人方面还不能人尽其才，所以，急需培养和充分利用系统工程人才。这是符合人才强国战略的。

系统思想虽然早已广泛存在社会之中，而系统工程则是从理论和实践上把朴素的系统思想活动和工程概念大大的提高了。如系统工程已为整理项目设计思想提供了一个可行的工作步骤，要求定义项目的目标，并将其转化为设计决策的目标，它通过建模和各学科之间提供接口来利用各领域专家的意见，以达到集思广益。系统工程也为比较不同的设计选项提供了一套优劣准则，还剖析了不确定性及其对风险的影响。它为工程设计和完成有关事项设计提供了一套可靠而全面的决策方法，并指出进行理想设计所需要的信息，以用于设计的决策制订，是一种基于信息的设计方法，而且尽量利用有关的先进工具（如计算机等）来提高工作效率。所以，系统工程也就是把工程等设计看作是决策制订过程的一门学科。由于最大的失误就是决策的失误，因此，用好系统工程的重要性就不言而喻了。实践表明用好系统工程就能取得满意的整体效益。例如，为了解决我军信息装备长期以来“缺心无脑”、“少芯无魂”的被动局面，就运用信息系统工程，发挥作用，只用了约两年时间及颇少的费用和人力等资源，就研制成功了我国第一套以国产中央控制器（CPU）、操作系统为载体，拥有自主知识产权的军用电子信息平台和开发平台。这既是我国军用电子信息系统核心技术实现了国产化的标志，又可免除使用国外产品带来的安全隐患，具

有重要的军事和经济效益。

随着我国全面建设小康社会步伐的加快，人们对系统工程的期望与日俱增，例如说：科学发展观是个系统工程问题，提高执政党理论能力建设也是个系统工程问题等。这些都是强大的需求牵引力。同时能用于系统工程的科技（尤其是信息技术）飞速发展，这就是强劲的技术推动力。这是系统工程面临的大好形势，也是加速发展系统工程的难得机遇。

事物都是一分为二的，系统工程由于它的内涵和任务既有光荣的一面，也有其艰巨的一面。如涉及的面很广，进行决策时，要确认设计选项，为每种选项赋予一定的期望值，然后排序选优。但是在实际中，每个选项结果及其价值往往具有不确定性，在判断时应考虑环境中的哪些因素，就难以决定，尤其是涉及到深层次的利益再分配和敌情的变化等因素，就使得决策变得很复杂。这也是让系统工程中的某些决策很难言传的部分原因。有时，设计的内容甚至没有明确的边界，以至有人认为系统工程本身尚未形成一门完整的学科，只能算是多种学科的集合体。这说明系统工程还正在成长，另外由于系统工程牵扯的面很宽，必然涉及到多方面的利益及其再分配的问题，加之，我国还处于社会主义的初级阶段，实行社会主义市场经济，多种分配形式并存，体制改革处于攻坚阶段，各种遗留问题（如条块分割，部门垄断等）尚待解决，所以，全面贯彻系统工程必然会遇到新问题，甚至会遇到某些阻力。这是前进发展中的问题，是会逐步解决的。当前，需要上下共同努力创造让系统工程充分发挥作用的社会环境和工作平台。大力培养系统工程人才，充分用好已有人才，因为人才的浪费是最大的浪费。系统工程工作者则要更深入实际，结合国情艰苦奋斗，不负众望。

系统工程的理念是令人向往的，实践中已取得了很大成就。报端常见“这是个系统工程问题”，这是对它的褒奖。也有一听说“这是个系统工程问题”就哈哈一笑，一笑了之。我们要进一步总结经验发扬已取得的成绩，弥补不足，面对现实，抓住机遇，迎接挑战，勇于实践，加快发展。

去年是抗战胜利 60 周年，郑和下西洋 600 周年，国际形势复杂多变，我国社会发展蒸蒸日上，系统工程工作者肩负的责任是光荣而艰巨的，让我们共同努力为全面建设小康社会、为中华民族的伟大复兴做出我们应有的贡献！

中国航天系统工程

郭宝柱

中国航天科技集团公司科技委，北京，100037

中国航天科技工业创建以来，管理体制历经调整变化，航天产品不断更新换代，而系统工程方法却是中国航天几十年管理实践不变的主旋律。

中国航天在运载火箭、人造卫星、宇宙飞船和导弹武器的研制实践中成功地发展形成了一套有效的系统工程方法，包括总体设计部、研制程序、工作分解结构、技术状态控制和阶段评审等。中国航天业经历了一个起伏跌宕的发展过程，面对新形势的挑战和跨越式发展的要求，必须运用钱学森提出的从定性到定量综合集成的方法。中国航天科技工业，在改进和完善工程系统工程方法的同时，也在社会系统工程方法研究上跨出实质性的一步。

一、航天系统工程方法

中国航天系统产品是指运载火箭，人造卫星，载人飞船和导弹武器系统，也称为航天型号。系统工程从需求出发，综合多种专业技术，通过分析、综合、试验和评价的反复迭代过程，开发出一个总体性能优化的系统产品。一个航天型号的研究、设计、试验、生产是一个复杂的组织管理过程，必须考虑到从概念研究到部署使用全寿命周期活动的要求；必须综合集成多种学科和专业技术，包括一些必须事先攻关的前沿技术；必须组织成千上万科技人员和管理人员在十几年的研制过程中协同工作；同时，必须保持在整个研制过程中技术、经费和进度的协调进展。系统工程方法是组织管理这些航天型号系统研制工作的唯一选择。

在国外对系统工程讨论和实践的同时，中国航天科技工业通过研制管理实践同样获得了对这种系统方法的认识。从早期自行设计的型号开始，中国航天的科技和管理人员就在进行着系统工程方法的探索，并总结了一套具有中国特色、符合科学规律的工作规范，为中国航天系统工程方法的发展奠定了基础。1978 年钱学森在文汇报上发表的文章《组织管理的技术——系统工程》，是对中国航天创建和发展时期系统工程实践的总结和理论上的升华。今天在中国航天科技工业，重视系统总体作用，按研制程序开展工作，充分进行地面试验，严格控制技术状态，强调阶段评审，无论对于科技人员还是管理人员都已经是一种自觉的行动。

总体设计部的设置强调了系统分解与集成的思想，是中国航天系统工程方法的重要体现。总体设计的基本任务是从用户任务的需求和上层的系统要求出发，在预算、进度和其他限制条件下，设计一个整体性能优化的系统。总体首先确定系统在更大的系统环境下的位置和环境关系，再从整体优化的角度权衡分析和确定系统的功能及性能；然后将它们分解到各个分系统，又从整体优化的角度协调分系统与总体，分系统与分系统之间的接口关系，设计并组织系统试验和验证，最终完成系统的整体集成。总体工作面对高水平的使用或技术要求，各种限制条件甚至苛刻的使用环境，参差不齐的技术基础，复杂的界面关系，利用原有的经验，发挥聪明才智，最终实现的是整体功能的涌现和优化。按照系统论的观点，即在整体上实现了“1+1>2”。

严格按研制程序办事来自历史的经验和教训。复杂系统从任务需求到系统验证交付是一个很长的研制过程。研制程序的划定使得系统研制从需求出发，设计逐步细化，最终演化形成一个整体性能优化的系统，是一个有序的逐步递进的研制过程。它保证了一个复杂系统的设计从一开始就考虑到了所有的专业和使用环境的要求，不会最后出现方案性的失败，它也保证了一个长周期的研制过程能够分阶段来实施对目标的跟踪和控制。

工作分解结构描述了产品研制所要开展的全部工作，是一个按产品层次分解的树状结构，在内容上包括系统产品和保障两个部分。产品部分的各层次分别代表系统、分系统、部件等产品的研制工作；保障部分包括集成与实验，工程项目管理，保证性设施与设备等。工作分解结构的每个子项都是一个工作包，都有确定的技术要求，都是一个独立的成本核算单元，一个独立的责任单元。

技术状态管理，或称配置管理保持技术开发活动有序进行，控制重大的更改。基线概念是技术状态控制的基础。基线是在一个技术开发层次完成以后对系统状态的描述。后一个开发层次的重要研制活动，应当在上一级基线建立，稳定和受控之后才能开始进行。在系统级要求确定以后，形成了系统级规范文件，同时系统级的基线(功能基线)也随之而建立。系统级要求传递到低层次子项，形成子项的初步设计要求，子项的性能规范确定以后，就构成了系统的分配基线。然后，系统向详细设计进展，生产基线也开始随之开始建立。技术状态控制是对更改过程的管理，是在基线建立以后对系统或子项目更改时，所履行的申请、评估、批准等一系列工作程序。这个程序审定更改的必要性，保证更改对所有相关环节的影响都得到认识。

航天系统从概念到产品要经历一个很长的开发过程。在每一个研制层次完成之后，必须评价是否已经满足了预期的技术经济目标，为是否可以进行下一个层次的研制提供决策依据。对于采办方和承制方，阶段评审都是至关重要的控制手段。系统工程方法中常见的几个重要阶段评审的例子是系统定义评审(SDR)、初步设计评审(PDR)和关键设计评审(CDR)。

评审是在各层次上进行的一个过程而不是一个单独的事件。为了真正达到评审的预期目标，必须明确评审的准则，全面准备数据资料；选择相关方面合适的人选；评审会前，评审委员应当提前分析研究资料，准备意见和建议；会上，各种观点和建议在评审会上充分讨论，最后由评委会做出书面评审结论；会后，评审意见要告知有关方面。

信息是系统工程工作的对象，也是系统工程管理的基础。计划与控制过程中所使用的许多工具和方法，例如计划流程、技术流程、进展报告、调度会议、以及甘特图、PERT/CPM 进度网络图、成本曲线图、资源分配表和资源负荷图等软件工具，目的都是保证经费、进度和技术目标按预定的方向均衡进展，而适当的信息在适当的时间到达适当的位置是这些工具和方法发挥作用的前提。

二、航天科技工业的系统分析

系统工程方法是世界航天的共识，也是中国航天通过研制实践得到的宝贵财富。依靠广大科技人员的创造性劳动和系统工程方法，一个又一个新的概念演化成为满足使用要求或者技术发展需要的航天系统。中国航天从创立到发展 50 年以来，在导弹、火箭、卫星、载人飞船等历次大型首飞试验中，绝大部分在总体方案上一次成功，正是中国航天系统工程方法成功运用的最好证明。

中国的航天科技工业依靠“自力更生、艰苦奋斗、大力协同、无私奉献、严谨务实、勇于攀登”的航天精神，在全国各条战线的大力支持和协同下，经历了 20 世纪 60 年代的艰苦创业，到 80 年代仍然平稳发展，大型试验计划陆续取得成功，航天技术取得了突破性进展。然而，从 90 年代初期开始，航天型号飞行试验连续失利，甚至发生箭毁人亡，到了没有退路的地步。严峻的形势，巨大的压力，使中国航天人再次激发起强烈的事业心和责任感；从高层领导、资深专家到基层科技、管理和生产人员呕心沥血，各尽其责，制订了“28 条”、“72 条”、“双五条”等一系列有效的技术和管理措施，终于扭转了局面，走出了低谷。从 1996 年最后一次失败到现在，大型飞行试验已经几十次连续成功，再次呈现稳定发展的局面。

中国航天科技工业起伏跌宕的发展历程所反映的复杂演化规律，单从某一个角度是很难深刻认识的。因为在这里我们面对的航天科技工业是一个复杂的社会系统，或者是一个开放的复杂巨系统。

在特定历史条件和计划经济环境下发展起来的中国航天科技工业，最初注重的是航天技术的突破，并逐步发展形成一整套重点针对技术成果的组织管理方法，这对于我国航天事业在起步和初步发展阶段获得巨大的成功起了决定性作用。随着外部社会经济体制、国家的需求以及科学技术水平的变化，系统内部的组成要素，包括任务、设施、物资、技术、信息和管理方法，特别是作为系统复杂性重要根源的人都

会表现出新的不适应,从而影响到系统的宏观演化规律。为了深入理解和认识航天科技工业不断发展、不断追求新的平衡的历程,必须以系统科学的观点,运用钱学森提出的从定性到定量综合集成的方法来分析这种复杂的发展规律。在试图描述系统复杂性的本质特征及其产生机理的时候,当前首先要重视对系统全面深入的定性认识和分析,充分认识国内外政治、经济、技术大环境的发展变化,分析航天科技工业的系统特点和它的演化过程,研究系统内部要素,特别是人的复杂心理现象、不确定的行为方式和非线性的相互关系与环境的相互作用所产生的宏观影响,从而得出一些系统性、指导性的意见。在改进和完善工程系统工程方法的同时,也在社会系统工程方法研究上跨出实质性的一步。

今天中国的航天技术已经从试验阶段走向应用阶段,国民经济建设、科技进步和国家安全对航天型号在技术水平上、质量上、数量上也提出了更高的要求。为了保持航天的持续发展,有必要重新认识航天科技工业整体发展目标,进一步完善和改进管理方法,以提高工作效率,缩短研制周期、合理利用资源,降低研制成本、满足性能指标,确保产品质量,进而实现中国航天的跨越式发展。

参考文献

[1] Blanchard B S, System engineering management[M], New York, John Wiley, 1998

[2] Kossiakoff A, Sweet W N, Systems Engineering: Principles and practice[M], New York, John Wiley, 2003

[3] 王希季:卫星设计学[M],上海科学技术出版社,1997

[4] 许国志:系统科学[M],上海科技教育出版社,2000

[5] 于景元,周晓纪:综合集成方法与总体设计部[J],复杂系统与复杂性科学,2004.1,1(1),20—26

知识密集型草产业与系统工程

郝诚之

内蒙古科学技术协会，呼和浩特，010020

一、大草原没成为经济新优势，问题出在哪里

知识密集型的草业产业是著名科学家钱学森先生1984年6月28日在《内蒙古日报》上发表专论《草原、草业和新技术革命》时首先提出来的。后《人民日报》1985年3月7日全文转载。1985年4月，钱老在中国草原学会和中国经济学术团体联合举办的"中国草业问题研讨会"上，发表了题为《中国草业产业》的讲话，阐述了他对大草原没成为我国经济新优势的思考，深刻分析了我国"草原亮出黄牌"和草业不被重视的原因及后果。

我国是一个草原大国，拥有各类天然草原近4亿公顷，居世界第二位，约占全球草原面积的13%，占国土面积的41.7%，是耕地面积的3.2倍，森林面积的2.5倍。草原与土地、森林、海洋一样，是重要的战略资源。丰富的草原资源为我国草业提供了巨大的发展空间和发展潜力。

为什么曾经养育过一代天骄的草原帝国，后来竟变成需要国家输血的荒漠之地？是新中国领导不知情、不重视吗？否！且不说20世纪50年代中央就有一系列加强牧区工作的政策规定。60年代刘少奇主席、朱德委员长视察内蒙古呼伦贝尔草原，明确要求"开荒与保护草原有矛盾时，要服从保护草原。"朱德同志还留下了充满自豪的诗句："三大草原两失败，我国草原依然在"；"保护东北大草原，富及子孙唯所赖"[1]。就是"文化大革命"后的70年代，邓小平等中央领导也多次强调"种草为主，发展畜牧业"。如1978年8月，邓小平同志即指出："种草比种树容易，种草可以防止水土流失，也可养牛养羊，比种地富足。"1980年5月，邓小平同志在《关于农村政策问题》的谈话中强调："像西北的不少地方，应该下决心以种草为主，发展畜牧业。"1983年1月，中共中央在《关于当前农村经济政策的若干问题的通知》中指出："我国的畜牧业，特别是发展牛羊等草食动物，潜力很大。认为粮食不过关，畜牧业就无从发展的看法是不符合实际的"，"发展畜牧业，实行农林牧结合，反过来又会促进农业"。1984年3月，中共中央、国务院在《关于深入扎实地开展绿化祖国运动的指示》中规定：到本世纪末，"力争种草面积达到5亿亩，使退化、沙化的草场逐步得

到恢复和改良”。1987 年 8 月，国务院更在《批转全国牧区工作会议纪要的通知》中指出：“牧区要坚持以畜牧业为主、草业先行、多种经营、全面发展的方针”，进一步确定了草业的地位[2]。

钱老回忆说：“1983 年秋，胡耀邦同志在西北视察，提出在甘肃省等西北地区发展农业生产要因地制宜，首先种草种树。这个号召给我很大启发，使我认识到农业还有得从种草做起的地方。在农业和林业之外，还有一个草业。国家有农业部、林业部，没有草业部，而我国草原面积是农田面积的三倍多，约有 43 亿亩，怎么能忽视草业呢？”钱老说，为什么“党的十一届三中全会以来，中共中央、国务院和中央领导同志有许多关于种草和建设草原的指示，而草业仍起步艰难”？他深入研究内蒙古等地的情况后发现：“不重视草业是因为它的产值很低，所以就附带着包括在农业中，不值得单独列出”[3]。他从时任内蒙古党委第一书记的周惠同志发表在《红旗》杂志 1984 年第 10 期的文章《谈谈固定草原使用权的意义》读到了如下统计数字：“在内蒙古自治区，共有 13 亿亩草原，1947 年到 1983 年这 37 年中，畜牧累计产值 100 多亿元，折合每亩草原年产值平均才 0.2 元多。这的确比每亩农田的年产值小得多，只有个零头！”钱老简直不敢相信自己的眼睛，这和国外的差距太大了！纵观世界现代农业经济的发展，以农业为主的西方现代化国家无不以草业为重要基础产业。新西兰、澳大利亚、加拿大、美国是典型的草业支撑现代化的农业自不必细论，就是 100 年前的欧洲，如英国、比利时、瑞典、丹麦、法国、意大利等地，也是以草业为平台实现了农业现代化的。他们都把草地和优良牧草看作是“绿色黄金”(英)、“上帝恩赐之物”(法)、“立国之本”(新西兰)、“绿色银行”(美)。

为什么我国的草地资源利用水平落后到如此地步呢？草业知名专家任继周、洪绂曾、李毓堂等分析认为，一是由于社会历史的原因，观念陈旧。二是不按规律办事，掠夺性开发。三是靠天养畜，生产经营方式落后。四是体制性、结构性矛盾突出。五是没有专门的国家管理草业的机构，管理不到位。目前我国草地资源优化管理开发水平比世界经济发达国家落后半个世纪以上。20 世纪 30 年代以后，世界经济发达国家在社会发展战略、机构设置、投资预算和科教事业发展中都把草地资源的科学开发摆上重要位置。他们通过严格执法，围栏化保护，科学轮牧，合理利用，不断改良和大力兴建人工草场(占到草地总面积的 30%～80%)，使草地生态和生产力达到很高水平。而我国对草业发展认识不足，草原保护与利用矛盾突出，长期投入不足，科技支撑不够，支持保障体系很不健全。我国北方草原家畜平均超载 36%以上。草原生产能力下降，平均产草量较 20 世纪 60 年代初降低了 1/3～2/3。全国 90%以上的可利用草原不同程度地退化、沙化、盐渍化。自 20 世纪 50 年代以来，全国累计约 2000 万公顷被开垦，其中近 50%撂荒成为裸地或沙地[4]。

钱老在与有关部门领导的接触中感到了问题的严重。1989 年 1 月，钱老在给国务院领导同志的信中谈了自己的担忧和扭转局面的建议：“不久前原农业部副部长、

老农业科学家杨显东对我说'60亿亩草原草地比耕地大四倍，是我国极大的一笔财富；可惜现在已沙化20亿亩，如不大力拯救利用，是我们的罪过。'"钱老说："问题最严重的是43亿亩草原和大约2亿亩沿海盐碱草滩，这45亿亩潜在资源不受重视。不受重视，因为这45亿亩年生产值才几十亿！但我们要看到，搞好了，真正运用现代科学技术，年产值可以达到几千亿人民币！"钱老认为管理好45亿亩草原是"社会主义中国的一件大事"，要有专门的国家管理机构，"不能放在眼前工作十分繁忙的国家农业部去管。我建议国务院考虑设国家草业局，专管草原及草滩。将来到21世纪，国家会有草业部。"[5]

很多人认为，中国是个以农为本的国家，黄土地带很可能是中国农业的发源地。早期周朝人流传的民歌，就提及很多不同种类的耕作物。中国人重粮轻草，主张素食，是几千年的传统使然。其实在中国农耕为主的黄河文化、长江文化之外，还有爱草重畜、崇尚自然的草原文化，三者共同构成了中华文明的主源。

1988年2月，钱学森先生发现有份内部材料上写着"我国人民吃肉不能靠草原"。理由是新中国成立"三十年来的统计数字说明，草原畜牧太困难，不如在农区搞肉吃"，继续大养其猪。钱老对此种说法很不以为然："照此说法，我们讲的草产业就走不通了。我看说这种话的人是目光短浅，看不到现代科学技术的强大威力，草原就不能进入良性循环吗？"[6]

钱老认为，"广大干部受历史发展的限制，总以为草原是取之于自然的，天经地义，用不着去经营，也不愿去经营。加之草原属国家所有，即全民所有，怎样才能同牧民的畜牧承包制结合起来，做到草畜经营统一，长期未能解决。因此牧民的积极性调动不起来"。"在内蒙古牧区推行了草场划分到户(组)提取草原管理费、牲畜作价归户适当提留的生产责任制，也就是草畜经营统一的生产责任制。这个认识问题现在终于得到解决"。[7]

2002年12月18日，钱老在给内蒙古沙产业、草产业协会领导的信中深刻地指出："江泽民同志在十六大报告中讲到西部大开发问题时提出：'积极发展有特色的优势产业'。内蒙古的优势产业是什么？我认为就是沙产业和草产业，这是内蒙古新的经济增长点。只要内蒙古的同志紧紧抓住了这两大产业，真正建设成知识密集型的沙产业和草产业，内蒙古的社会主义现代化建设就会迈上一个新的台阶，内蒙古的生态环境也会得到改善。"[8]

二、草产业就是草业系统工程，变生物转化链为经济增值链

钱老倡导的"草产业是以我国北方大面积草原为基础，以种草、牧草开始，用动物转化，多层次深度加工，包括食品工业、生物化工等综合利用的知识密集型产业"，是利用阳光、通过生物、依靠科技、延伸链条、面向市场、创造财富的草业系统工程，

又称知识密集型的草产业。而“草业系统工程实际是草产业的组织、经营、管理的学问”。[9]

钱老1984年就指出:“怎样利用现代科学技术发展草业?还得从利用太阳光这一能源做起,搞好光合作用,也就是要精心种草,让草原生长出大量优质、高营养的牧草。”这第一阶段可以称为是通过阳光,把二氧化碳、水、叶绿素转化为植物蛋白的“过光转化”过程。钱老说:“太阳光是一个强大的能源,在我国的地面上,每平方厘米每年有120~200大卡的能量,也就是每亩每年接受太阳的能量相当于114~190吨标准煤。”“限于水和肥料的供应,限于光合作用必需的二氧化碳在大气中的浓度,限于植物本身的能力,上述巨大太阳光能只有很小一部分转变为植物产品。这个比例不到百分之一,常常只有千分之一。”“就是变成植物产品了,光合作用生产的产品,人也不能全部直接利用。就以粮食作物来说,籽实在干产品中占不到一半,其他百分之六十是秸杆。”[10]而通过饲料作物和牧草喂养牲畜转化,情况就好得多:牲畜把草变为乳、肉、皮、毛、绒、内脏、骨杂的过程,就是通过消化器官把植物蛋白变为动物蛋白的“过腹转化”过程,这是第二阶段。把动物蛋白经过现代设备“流水线式的生产”和科学管理进行初加工、深加工、精加工的“过机(器)转化”过程,是第三阶段,得到食品、药品、纺织品等合格商品。商品通过市场营销网络、全程服务、品牌打造,形成核心竞争力,变为“增了值的货币”(马克思语),则是个“过市(场)转化”的过程,属第四阶段。上述“四过转化”是草产业“绿化—转化—产业化”流程中的关键环节。构成了“高效益的”,“草畜工贸四结合”的,以工农衔接、城乡一体、上中下游关联为特征面向市场的、现代化的完整的产业体系,类似于“种养加”、“产供销”高度综合的“龙型经济”。

钱老强调:“草产业的概念不仅是开发草原、种草,还包括饲料加工、养畜、畜产加工。最后一块也含毛纺织工业。”[11]钱老1992年1月1日收到李毓堂研究员《草业系统工程的理论与模式》的研究报告后,回信说:“知识密集型的草产业可否用一句话来概括?即:这个草产业要最有效地把草原、草地上的太阳光能,首先通过植物,然后动物的转化,再加水资源、能源及其他工业材料的投入,最后产出的是直接上市场零售的商品。所以是草业加深度加工业。”钱老在给多位专家的信中讲了深加工的类型,如:“日本人曾发现,把畜类的骨头磨成粉浆,可以制成‘骨头豆腐’,既营养,又可口”[12];“充分利用农牧产品,也可开设制革厂”[13];“将肉食制成塑料袋装直接上市,畜脏可提药者直接制药,下脚入饲料”,强调“这样才是草产业,经济效益一定很高。”[14]

钱老看到王明昶研究员的专著《草业系统工程理论与应用研究》后,欣慰地说:“利用系统工程的草产业,实是以草原为基地的草、牧、畜加工、饲料工业、畜产制药,以至皮革制品,商贸的综合性产业体系,所以要用系统工程来组织经营。”[15]这样草业系统工程理论与应用研究在一起步就应考虑:根据全部科学技术成果,有什么可

以为草业系统工程利用的？眼光放开，‘种’如何改进？‘养’如何改进？‘加’如何改进？‘产、供、销’如何改进？只有这样才能考虑到下个世纪实现第六次产业革命的宏图。”[16]

钱老在《草原、草业和新技术革命》的专论中，详细论证了如何用现代科学技术和现代市场观念发展草产业生物转化链，使其变为经济增值链。用系统工程的思想，勾画出了面向未来、极有创意的新结构图。从精心种草、饲料加工、工厂化饲养、畜产品综合加工，到利用畜粪种蘑菇、养蚯蚓、沼气发电、残渣养鱼、废液还田；从草业综合生产基地、定居点、现代“草业新村”（即小城镇），到县域经济、通讯电视、政治文化教育中心；从中长期规划到分步实施；从综合利用到人与自然、社会和谐发展，都是珠联璧合的整体设计。（见图 1：钱学森草业系统工程示意图）

实践证明，钱老 1984 年关于内蒙古牧区草业系统工程的论述，是具有中国特色自主知识产权的、有全球眼光、战略思考、系统分析的第六次产业革命理论的重要组成部分。它围绕一个“省”字，走资源节约再生的循环经济之路；突出一个“链”字，走“农工贸一体化”、“草、畜、工、贸四结合”的龙型生态经济之路；强调一个“转”字，坚持“一层接一层，一环扣一环”，走新型的涉农的工业化的集约经营之路；追求一个“增”字，走技术创新、成果集群、系统耦合、文化衔接、效益叠加的知识经济之路。

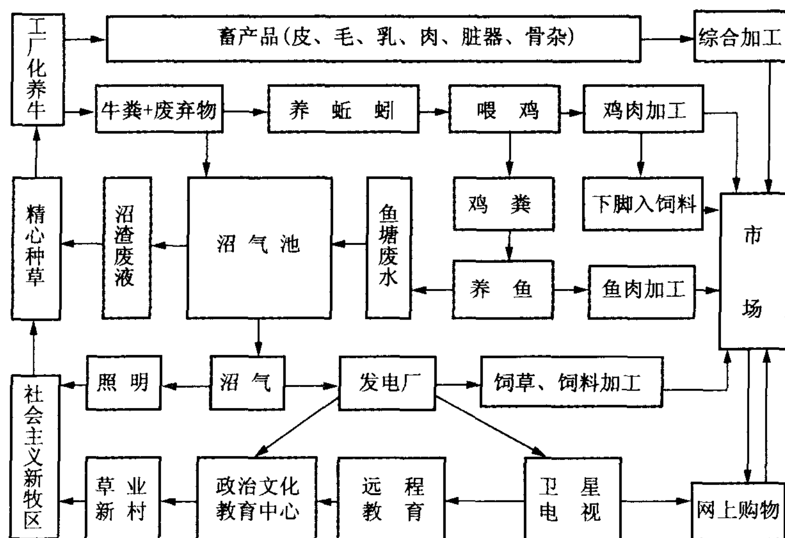


图 1　钱学森草业系统工程示意图

三、遵循西部特殊规律，科学破解“三农”问题

2000年3月28日，钱学森先生给中央领导同志的信中谈了他对西部科学开发的建议，重点是用草产业、沙产业的新思路破解“三农”、“三牧”问题，用科学技术帮助农村、牧区的人民早日富裕起来。

钱老说：“我过去在搞‘两弹一星’试验时，常去西北地区（包括甘肃、新疆、内蒙古等）出差，对那里的自然条件、生态环境、经济发展和人民生活的状况是了解的。”他认为新中国成立以来，我们已经搞过两次西部大开发，成绩不小，但不尽如人意的地方也有，值得认真反思。他说：“据我所知，解放后西部地区曾有过两次大的建设，一次是（上个世纪）50年代，苏联援建156个项目时，有些重大项目建在西部和西北地区；另一次是60～70年代的三线建设。这两次建设无论从资金的投入，还是从科技的含量和人才的荟萃等方面来看，其水平和力度都是相当可观的。这些建设推动了西部的发展，但并未从根本上改变西部地区的落后状况。究其原因，我认为是这些建设并未和西部的经济基础，即农业的发展结合起来。所以，其结果是少数工业项目上去了，但广大农村的广大人民仍然是贫穷落后的。所以我感到，西部的开发虽然是全面的、综合的，但仍然要以农业的发展为基础。只有这样，才能从根本上改变西部地区的贫穷落后状态，也才能改变西部地区的生态环境。”[17]

我国西部的三农问题，说到底，是农业如何增加效益，农民如何增加收入，农区、半农半牧区和牧区如何稳定。边疆安才能国家安。国家长治久安靠的是农民、牧民安居乐业。钱老早在1993年11月，就在给原甘肃省副省长、后中国科协副主席刘恕的信中说过：“因为中国西半部有众多的少数民族，他们同亚洲西部、亚洲东南部国家的居民有共同语言、文化传统，一旦中国西半部的社会主义建设搞好了，对他们必定有重大影响。这是世界社会主义的大问题！”[18]西部是我国大江、大河的源头，也是沙尘暴的主要源头。西部范围主要是边疆地区、民族地区和贫困地区。西部大开发，要解决的是东西部发展得不平衡。生态是重点，沙漠化防治是难点，牧区、沙区少数民族群众早日脱贫致富是焦点，突破口是产业化，发展草产业、沙产业是最现实的科学的选择。

钱老说：“要搞好西部的农业，我想也应该有新的思路。因为西部，特别是西北部地区，其自然条件与东部和中部地区有很大差别。所以不能用东部和中部搞农业的传统办法和常规手段去抓西部农业，将来的西部农业也不可能是现在东部农业的翻版。”科学的发展观一是要按规律办事，二是要从实际出发，三是要保护环境，四是要以人为本。“怎样才能使西北地区的农业走出困境？我想，西北地区是大片戈壁沙漠，大约有16亿亩，和我国农田面积差不多。戈壁沙漠干旱少雨，但干旱少雨的另一面是阳光充沛。这是西北地区农业发展的不利和有利条件。问题是我们过去

对不利条件看得重，故侧重于‘治理’，搞植树防沙、堵沙等。这是对的，也有成绩，但有点消极。对阳光充沛这样的有利条件，则没有注意从积极的方面去利用和开发。1984 年，我基于对高科技农产业的理解，结合西北地区的特殊情况，提出了在我国西北地区要建设沙产业、草产业和林产业的观点。”“我相信，我国的畜牧业将会有一个大发展，为全国人民提供丰盛的肉蛋白。这就是我提出草产业的指导思想。”[19]

1984 年 6 月钱老就对内蒙古自治区带头抓草产业寄予厚望。他在《草原、草业和新技术革命》一文中指出，内蒙古有 13 亿亩草原，如果“下决心抓草业”，“可是件大事”。因为“农田少，大约才七千万亩，而草原面积却是农田面积的十八倍还多，所以草业的产值完全可以大大超出农业的产值。一旦内蒙古带好这个头，全国的草原利用好了，草业兴旺发达起来，它对国家的贡献不会小于农业。”[20]

1994 年，内蒙古半农半牧区的乌兰察布盟响应钱老号召，在深刻总结多年来单纯生产粮食经验教训的基础上，冲破旧的思想观念束缚，提出了“进一退二还三”的化解三农问题的新的发展方略，即建设一亩水浇地，退两亩旱作坡耕地，还林还草还牧。从 1994～2000 年，共退耕 1200 万亩。同时，充分利用灌木林和牧草优势，大力发展舍饲畜牧业。试验六年，在耕地缩减 1/2 的情况下，粮食总产从 6.4 亿公斤增加到 11.5 亿公斤；人均占有粮食由 1994 年的 250 公斤增加到 600 公斤；牲畜头数从 380 多万头（只）增加到 1200 万头（只），纯增 67.7%，农牧民人均纯收入从 745 元增加到 1838 元，农牧业生产由广种薄收、粗放经营走向了精种高产、集约经营。他们“为养殖而种，为出售而养”的结构调整、大胆改革、政策创新，为后来中央实行的“退耕还林还草”工程提供了经验。一是推动了农牧业生产经营方式的转变，实现了精种、精养、高产、高效。二是推动了产业结构优化调整。通过退耕还林还草工程，发展了农区畜牧业、草产业、林产业及相关的加工业。三是促进了农村剩余劳动力的转化就业，规定补助期 8 年，给部分离开土地的农民提供了极可贵的缓冲期，为他们向二、三产业转移打下了基础。四是树立了科学发展观，有了以人为本、产业扶贫、科技兴农、生态生计兼顾的新思路和自信心。[21]

人们越来越深刻地感到，“人民科学家”钱学森先生一生的追求是八个字：志在强国，心在富民。他不但为“两弹一星”事业做出了巨大贡献，而且以战略思考指导着第三次西部大开发的科学进行。钱老说：“我们在 21 世纪实施西部大开发战略，自然起点要高。所以我提出的林产业、沙产业和草产业，都强调是知识密集型的，要把现代科学技术，包括生物技术、信息技术都用上。而且一开始就搞产业化，形成‘生产、加工和销售一条龙’，并注意综合利用。这种高技术产业化的农业，实际上已和工业及经贸、服务等第三产业结合起来了，所以可以做到对农业生产实行工厂化管理。由此发展起来的小城镇，已大大缩小了工农之间以及城乡之间的差距。”[22]

党的十六大把增强可持续发展能力、改善生态环境、提高资源利用效率、促进人与自然和谐发展，作为全面建设小康社会的重要标准。钱老产业化、工业化、城市化

“三化互动”的思想，逐步得到有关部门及高层的理解和认可。钱老离开一线工作后，密切关注着我国西部民族地区破解“三农”、“三牧”问题的草产业雏形的涌现和成长，验证和完善着自己提出的知识密集型的草产业理论和相关设计。

钱老 1995 年 8 月深有感触地说：“我注意到近日来报刊对治沙有不少消息：一方面有人民中的实干家，另一方面有地方政府中的积极领导干部”，两者“结合”了，草产业和沙产业就“启动”了，“在内蒙古自治区已有好几处治沙有成绩”，要“推动他们”向草产业、沙产业发展。[23]

地处鄂尔多斯高原黄河南岸、库布其沙漠东缘的内蒙古东达蒙古王集团，响应钱老号召，实践钱老理论，建起了内蒙古沙产业、草产业的首批试验示范基地。他们坚持在高耐旱、高耐寒、高抗逆的沙生灌木林——沙柳基地内推广立体种植，推行灌、草间作，林牧结合；并开辟工业用途，创新“沙柳制浆配抄涂面箱板纸”工艺；还循环使用附近电厂的废水，再变废水为肥水，改土肥田，扶持农业，从而做到了沙柳产业化的综合利用，兼顾了生态、造纸、环保、扶贫。他们将占沙柳平茬物 85%的粗壮枝干用于造纸，年产 50 万吨一期 10 万吨的箱板纸项目已经启动。他们让占 15%的细梢嫩枝物尽其用，伴入部分氨化的农作物秸秆粉，配成混合营养饲料；加上他们在沙柳基地的行间空地种植的新鲜优质牧草（如羊柴、沙打旺、紫花苜蓿等），已成为初具规模的 25 万只舍饲绒山羊基地的饲草料来源。通过科技人员对绒山羊的选育提高，成年母羊、公羊的个体产绒量提高 3 倍多。靠高科技减少绒山羊头数，靠高效益打造核心竞争力，现在“东达蒙古王”注册商标已成为内蒙古著名品牌。[27] 2001 年 5 月 30 日，钱老看到集团总裁、内蒙古政协委员赵永亮和时任内蒙古政协经济委员会专职副主任郝诚之书面报告后，高兴地说：“我认为内蒙古东达蒙古王集团是在从事一项伟大的事业——将林、草、沙三业结合起来，开创我国西北沙区 21 世纪的大农业！而且实现了农工贸一体化的产业链，达到沙漠增绿，农牧民增收，企业增效的良性循环。我向您们表示祝贺，并预祝您们今后取得更大成就！”[24]

四、由理论创新到科学决策，抓好“西部 21 世纪的大事”

为了推动内蒙古自治区在我国草产业发展上走进前列，1984 年 6 月以来，钱老通过多次书信，指导内蒙古自治区带头抓草产业“建设试点”，认为“先从奶、肉、毛、绒四个类型做起很好”。[25] 据内蒙古自治区政府发展生态畜牧业调查组报告，在伊利、蒙牛和北京三元、上海光明乳业龙头企业带动下，已形成以呼和浩特市、包头市、呼伦贝尔市为中心的 50 万头高产奶牛养殖基地；以草原兴发、科尔沁等龙头企业带动下，已形成通辽市、赤峰市肉牛育肥养殖基地；在小肥羊、小尾羊等龙头企业带动下，正形成锡林郭勒盟、兴安盟、呼和浩特市、巴彦淖尔市农牧交错区的 1000 万只育肥肉羊基地；在鄂尔多斯、鹿王、维信等知名企业带动下，已形成鄂尔多斯市、巴彦淖

尔市、阿拉善盟绒山羊基地；在亿利资源、伊泰生物高科等龙头企业带动下，已形成鄂尔多斯市200万亩药用甘草基地；在宇航人高科技公司等龙头企业带动下，已形成呼和浩特市100万亩沙棘原料基地等，都卓有成效地辐射带动了周围广大农村牧区的经济发展。[26]其中伊利、蒙牛两大乳品企业2005年加工乳品已占全国的1/4，年销售收入200亿元，也占全国乳业销售收入的1/4，双双托起了内蒙古自治区首府呼和浩特"中国乳都"的辉煌。伊利、蒙牛已跃居中国乳品企业的龙头老大和老二，前者规模最大，后者速度最快，都是股票上市公司、中国驰名商标，都创造了十个以上的"中国第一"。呼和浩特市领导说："乳业已成为呼和浩特市的支柱产业，两大龙头企业不但为呼和浩特市贡献了1/3的国民生产总值，行业同比连续数年居全国37个大中城市之首；而且直接、间接创造就业岗位，帮助50万户农牧民脱贫致富，人均增加收入近千元。"[27]（见图2：内蒙古蒙牛集团草产业链示意图）

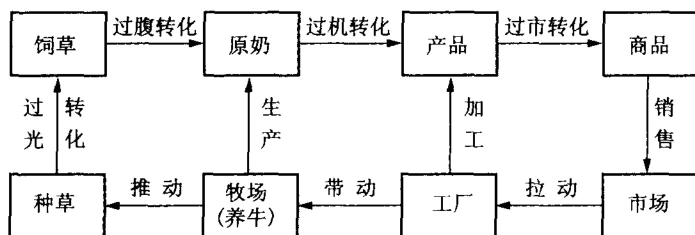


图2　内蒙古蒙牛集团草产业链示意图（卢俊绘）

中共中央总书记、国家主席胡锦涛2003年1月2日视察蒙牛乳业集团通辽分分司时说："内蒙古13亿亩草场，中国人均一亩，河套平原、西辽平原各拥有800万亩水浇地，退耕还草；这既有资源优势，又有市场需求，还有这样的龙头企业，何愁不能全面达小康！"[28]2006年4月23日国务院总理温家宝给重庆草产业企业留言："我有一个梦，让每个中国人，首先是孩子，每人每天喝一斤牛奶。"6月2日在内蒙古听伊利、蒙牛两大企业汇报，对"实现全民族'每天一斤奶'的目标，迎接中国乳业第二个春天"的提法很感兴趣。[29]

内蒙古自治区现在正实现着"三个历史过渡"：一是从游牧业向定居畜牧业过渡；二是由自给自足的自然经济向商品经济过渡；三是由靠天养畜向建设养畜、科学养畜过渡。半农半牧区和农区正在由自然放牧向舍饲限牧转变，由种、养分离向种、养结合转变，由输出原料向输出成品转变。上下已形成了共识：由数量增长型向质量效益型转变，由饲草业、草坪业为行业目标向"草畜工贸四结合"、"种养加销一条龙"的产业目标转变，是我国北方大草原重振历史雄风、创造时代辉煌的根本出路。

在换一种思维认识草原、草业、草产业时，只要变对抗为兼容，变单一为多样，变"输血"为"造血"，信心就显著提高了；生存动力、政策动力、市场动力三结合，效益就显著提高了。内蒙古草产业的健康发展表现为区域化布局明显，专业化实力增强，

生产经营的集约化程度明显提高。畜牧业综合生产水平已稳居全国五大牧区之首。牛奶2001年产量占全国的10.15%，居第三位；到2005年产量占全20%，已跃居第一位。与20年前相比，内蒙古自治区牲畜数量仅增0.7倍，但肉类总产量增加6.2倍。羊绒稳居全国第一位，"鄂尔多斯羊绒衫温暖全世界"的广告词已家喻户晓。草地生产率、劳动生产率和牲畜的群体出栏率、个体生产力都显著提高，畜牧业产值占全区农林牧渔总产值的比重已达38.9%。全区农村牧区规模养殖户23万户，产肉占全区总产量的33.5%，产奶占28.3%，产毛占26.4%，说明农牧民向养殖的集约化、规模化发展的步伐加快。[30]

内蒙古的草产业发展已出现了"八大变化"：一是由专家试点到农牧民实践，二是由农牧民个体经营到龙头企业带动，三是由资源简单转化到产业链延伸，四是从小基地示范到大集团加盟，五是从产业营销到名牌打造，六是从名不见经传到企业家军团出现及民营企业家挑大梁，七是从实物运营到资本运营及国际财团直接融资，八是由分散活动到内蒙古沙产业、草产业协会等行业组织发挥中介作用，以组织化保证产业化。

从1984年钱老应约给《内蒙古日报》发表专论，希望内蒙古在草产业的推动上给全国带头，到2006年3月，内蒙古自治区把"大力发展林产业、草产业、沙产业"列为重点，写进"十一五"规划，历时22年。[31]这是对国情认识的升华，对西部认识的飞跃。它的示范作用必将进一步彰显出来。

既然沙产业、草产业作为"西部21世纪的一件大事"(钱学森给新华通讯社田聪明社长的信)，立起了一座里程碑，那么我们有理由相信，一枝独秀终将唤来满园春色，钱学森先生第六次产业革命的曙光必将普照中华大地！

参 考 文 献

[1] 袁明铎主编:郝诚之副主编,《名人眼中的内蒙古》,内蒙古人民出版社1999年版第154页,184页

[2] 李毓堂:《草业——富国强民的新兴产业》,宁夏人民出版社1994年版第57—58页,第406—407页

[3] 钱学森:《草原、草业和新技术革命》,《人民日报》1985年3月7日;第406—407页

[4] "中国草业可持续发展战略研究取得重要成果",《中国农业信息》2006年第6期第4—5页

[5] 北京大学现代科学与哲学研究中心编,《钱学森与现代科学技术》,人民出版社2001年版第443—444页

[6]、[9]、[11]、[12]、[13]、[14]、[15]、[16]、[18]、[23]、[25] 刘恕,涂元季编:《钱学森论第六次产业革命通信集》,中国环境科学出版社2001年版第42页,第20页,第24—25页,第72页,第89页,第113页,第111页,第128页,第35页,第131页,第168页,第31页

[7] 钱学森:"中国的草业产业",《政协经济论坛》2001年第3期第50页

[8] 郝诚之:“对钱学森沙产业、草产业理论的经济学思考”,《瀚海凭栏——郝海之作品集》,内蒙古人民出版社2003年版第383—384页

[10]《智慧的钥匙——钱学森论系统科学》,上海交通大学出版社2005年版第260页

[17]、[19]、[22] 涂元季著:《人民科学家钱学森》,上海交通大学出版社2000年版第187—188页

[20]、[24]《九十华诞钱学森》,上海交通大学出版社2001年版第283页,第284页

[21] 内蒙古林业厅,《实施退耕还林还草工程是搞好西部生态建设基础》,“2004,中国西部发展论坛”交流论文第122－123页

[26]、[30]《内蒙古自治区政府发展生态畜牧业调查组报告》

[27] 呼和浩特市2005年乳业兴市经验介绍材料

[28] “胡锦涛总书记视察内蒙古蒙牛集团期间与政协委员牛根生的谈话”,《政协经济论坛》2004年第一期第5页

[29]《蒙牛足迹》2006年第21期

[31] “内蒙古自治区国民经济和社会发展第十一个五年规划纲要”,《内蒙古日报》2006年3月10日

综合集成在知识科学中的应用

顾基发

中国科学院数学与系统科学研究院，北京，100080

一、知识科学

知识科学作为一个学科出现还是近十来年的事。它的确切定义也还难明确的给出。从作者近年来接触到的内容大概可以分成以下几个方面：(1)知识管理；(2)知识工程；(3)知识创造；(4)知识科学基础；(5)知识系统。本文仅就知识管理与知识创造作较多叙述。

1. 知识管理

知识管理的出现仅有十几年的时间，在美欧日等国相当流行。各大企业纷纷采取知识管理手段来服务于企业的长期战略。有人曾对全球年收入超过一亿美元的175家公司的总裁进行了采访。采访的结果是，80%的总裁认为他们的公司能够在国际上得到发展，关键在于采用了知识管理。知识管理的方法可以分为编码和个人化两种战略。所谓编码的战略就是企业将形成编码的知识储存在数据库或知识库里，企业里的相关人员可以很方便的调用。另一方面企业的知识和他的开发者和使用者密不可分，所以要共享企业的战略知识和营销知识等，都要通过人的相互接触、相互交流、相互应用，这就是知识管理的个人化战略。

斯维比认为知识管理可以分两个方面：

管信息。这里他将知识看成在信息系统中要处理和弄清的对象。

管人。这里他将知识看成是由人的一整套复杂的动态的技巧、诀窍而且是不断在改变的过程而组成，也就是最具有创造性的是人本身。因此管好人也就是管好了知识。

2. 知识管理方法的分类

知识管理的方法可以分成以下三类：

(1) 机械方法；

(2) 文化/行为方法；

(3) 系统方法。

• 机械方法是把同类事情做得更好,这里包括更好的获取信息和利用信息,例如可以应用数据库,文本挖掘,上网提取信息,群件等。一般要求有大量的数据和计算机技术。机械方法着重管可编码的信息和知识,实际上这些也正是知识工程所研究的内容。

• 文化/行为方法靠的主要不是技术,而是管理隐知识资源。它更强调创新和创造。它把企业或机构看成是一个学习性组织。它涉及要改变组织的行为和文化。要用整体的观点,一般要求用大系统的行为理论。它处理的是事和人,而不是技术。文化/行为方法着重管有知识的人,而且是对企业有用的人。

系统方法认为知识管理的问题总是可以利用合理和逻辑的系统方法去解决,而且可以用模型把显性知识基本上表达出来。对于文化方面认为虽然可以去改变人也可以不一定变,但政策是可以变的,另外也总能成功地应用一些系统综合技术。

企业知识管理的核心内容是人力资源,目的是提高知识创新能力,工具是信息技术。从系统的知识管理出发,它应该是一个抽象化了的完整的"知识链"系统管理模型。

3. 知识管理的阶段

企业知识的获取是指企业将外部环境中的知识转换到企业内部,能够为企业所用的管理过程。它包括四个阶段:

(1) 知识的辨识;

(2) 知识的收集;

(3) 知识的整理;

(4) 知识的存储。

4. 知识管理的策略

第一种策略称作知识管理的市场化策略,其重点为知识来源的"寻找"与"整理",其工具为知识地图(Knowledge Map)。

第二种策略称作知识管理的系统策略,其重点为知识内容的"储存"与"流通",其工具为知识库(Knowledge Base)。

第三种策略称作知识管理的社会化策略,其重点为知识价值的创新与利用,其工具为知识社群(Knowledge Community)。

5. 知识的层次

知识可以分成 5 个层次:数据—信息—知识—智慧—道德。

前二层议论比较多,而且比较偏机械。后二层紧密与人相关。有智慧才能创造

更多新的知识，有道德才能保证知识和智慧为集体、组织和国家的有效使用。中间层次与两者都有关。也有人在信息与知识之间加上一个情报(Intelligence)，情报可以是有用的信息，也可以是没有用的，甚至有时是有害的。

二、知识的转换

M. Polanyi(1966)提出知识有显性和隐性两种。显性由于它的公开性比较好处理和好利用，难的是隐性知识如何获取和利用。1995 年野中和竹内出版了《知识创造公司》一书。提出了隐性知识与显性知识相互转换的 SECI 模式，它分成四个阶段：(1)社会化(socialization)：从隐性知识到隐性知识。(2)外化(externalization)：从隐性知识到显性知识。(3)组合(combination)：从显性知识到显性知识。(4)内化(internalization)：从显性知识到隐性知识。知识的转换 SECI 模式主要形式：

(1) 转换过程，强调从隐性知识转换到显性知识的过程；

(2) 组织过程，强调从个人知识到小组知识一直到群众组织的知识；

(3) 活动过程，强调每个过程中的获取知识的活动；

(4) 个人知行过程；强调一个人从知到行动的过程。

还有学者结合认识论与本体论提出 EO-SECI 模式。为了更好的知识积累、利用、转换和创造，野中又提出场(Ba)和知识引导等。

三、知识的创新

1. 知识的创新理论

如野中的 SECI model 和 Ba 概念以及中森的知识的创新方法论 ***i***—*system*(***i***ntervention，***i***magination，***i***nvolvement，***i***ntelligence and ***i***ntegration)；国藤和杉山的知识创造支持系统都是重要研究方向。

2. 知识的创造思维

创造思维有直觉思维，联想思维，逻辑思维和突发性(灵感)思维。

3. 知识创造主要技法

在西方有智暴，形态分析，综摄法(Synectics)等；在日本有 KJ 法，ZK 法，NM 法等。日本高桥诚，把创造技法分成三类：

(1) 扩散发现技法：主要是寻求问题所在，然后提出设想；

(2) 综合类技法：主要是收集情报，或者用于按照顺序来解决问题；

(3) 创造意识培养技法:为提出设想而控制大脑集中思想的方法。

4. 知识创造支持系统

为了更好的支持知识的创造各国开发了不少知识支持系统,在西方著名的有 Idea Fisher, Inspirations, Colab, Clear Board, TRIZ 等;在日本有 AA1, SC1, AIDE, Wadaman, Keyword Associator, KJ Editor, D-ABDUCTOR, GUNGEN, GRAPE, GrIPS, FISM, Meme Media, PMD 等;在中国有群体研讨环境 GAE, 电子公共大脑 Electronic Common Brain 等。

四、综合集成与知识科学

1. 综合集成方法及其研讨厅

综合集成方法强调把数据、信息、知识和专家经验结合起来,更强调发挥人的作用,人的智慧。研讨厅则是集智慧之大成,而且研讨厅本身也是一种很好的 Ba。

2. 综合集成流程图与知识转换

我们参加的重大基金项目课题组设计出的综合集成流程图,

会议 1→分析→会议 2

或

同步→分析→异步

本身很好体现了知识的转换,而且我们把模型这一帮助逻辑和直觉思维的工具应用得更为充分。

3. 基金重大项目与 EO-SECI-模式

在总结整个基金重大项目的工作过程我们认为它与 EO-SECI-模式也比较符合。

我们还应用复杂网络来描述大型科研项目的活动、合作和创新过程,并且还有较定量的描述。在知识转换和创新过程中我们采用了一些研讨工具,如群体研讨环境(GAE),整合综合集成与知识系统我们逐渐形成了综合集成知识系统的概念。

关于更详细的介绍可参考下列有关的文献,不再赘述。

参 考 文 献

[1] Nonaka, I. and Takeuchi, H.: The Knowledge creating Company, NY., Oxford University

Press,1995

[2] Nakamori Y., Knowledge management system toward sustainable society, *Proceedings, the International Symposium on Knowledge and Systems sciences*, JAIST, 2000

[3] Kunifuji S. et al: Creativity Support Systems in JAIST, *JAIST Forum*, Ishikawa High—Tech Koryu Center, 11 Nov. 2004

[4] Umemoto K.: Managing existing knowledge is not enough: knowledge management theory and practice in Japan, in *Strategic Management of Intellectual Capital & Organizational knowledge*, Oxford University Press, 2002

[5] Nonaka I., and Konna N.: The concept of Ba: Building a foundation for knowledge creation, California Management Review; 40 (3) Spring: 1998

[6] Pedro L. S., Enrique G. M. F., Garcia, M and Casterio M. C.: The EO-SECI model: an organizational learning and knowledge creation model, *Congreso SMS*-Sepiembre de 2002, http://www. fcjs. urjc. es/WebCatedra/investigacion. htm

[7] 林榕航:《知识管理原理》,厦门大学出版社,2005年

[8] 钱学森、于景元、戴汝为:一个科学新领域一开放的复杂巨系统及其方法论,《自然杂志》,1990年,13(1)

[9] Gu,J. F., Tang,X. J.: Metasynthesis System Approach to Knowledge Science, Proceedings of the first International Symposium on Knowledge Management for Strategic Creation of Technology, 2004

[10] Tang X. J. and Liu Y. J.: A prototype environment for group argumentation, Proceedings of the third International Symposium on Knowledge and Systems Sciences, Shanghai, 2002

[11] 顾基发, 唐锡晋:Meta-Synthesis Knowledge System for Complex System.《研究报告》,No. AMSS-2001-11,中国科学院数学与系统科学研究院,2001年3月

[12] Gu J. F. and Tang X. J.: Metasynthesis and Knowledge Creation, Sino-Japan Workshop on Metasynthesis and Creativity Support system ,July, 2005, Beijing

综合集成方法的实践——“中国载人航天发展战略”研究方法

钱振业[1]　杨广耀[2]　韦德森[2]　程玲珠[3]

1 中国航天工程咨询中心，北京，100037；2 中国空间技术研究院，北京，100081；
3 国务院发展研究中心国际技术研究所，北京，100091

中国作为一个发展中的大国，在航天领域已取得世人瞩目的成就，在此基础上中国要不要发展载人航天？如何发展载人航天？采取什么样的发展战略、任务目标体系以及选取何种发展途径等一系列问题，都需要做出回答。

发展载人航天，从表面上看是一个工程技术问题，或者说工程技术含量很大的命题。如果仅仅从工程技术角度来加以论证，往往难以得出正确的结论。这正是对这一问题争论不休、难以决策的症结所在。

载人航天发展战略涉及到政治、经济、军事、社会和科技诸多方面，具有强烈的社会科学属性和自然科学属性。载人航天发展战略又是一个涉及多层次（发展战略、目标体系、技术途径）、多学科、多部门的具有战略性、宏观性和综合性的“复杂巨系统”。

为此，我们运用钱学森院士提出的“定性与定量相结合的综合集成方法”来研究：中国作为一个发展中的大国，在航天领域已取得世人瞩目成就的基础上，“要不要发展载人航天？如何发展载人航天？采取什么样的发展战略、任务目标体系以及采取什么样的发展途径等问题”。以求对这一重大命题做出科学的结论。

一、指导思想

软科学研究，同其他科学研究一样，必须遵循科学的客观规律使其研究成果为领导决策提供符合实际的咨询建议，为决策科学化服务。为此我们在研究中遵循以下指导思想：

1. 用辩证唯物主义和历史唯物主义的观点和方法指导课题研究

前苏联于1961年4月12日首次把人送入太空，开创了载人航天新纪元。载人航天至1986年虽然仅有25年的历史，但取得了飞速的发展，当今科学技术发达的国家都在规划和实施载人航天计划。

我们应当如何去分析和认识这些事实。钱老在1987年1月5日就明确地指示

我们:"要说清楚我们社会主义中国为什么要发展航天技术? 这从一般的道理上讲完全是可以说得通。或者说用马克思、列宁主义,毛泽东思想来讲清楚。或者说可以用历史唯物主义的观点来讲清楚。"我们遵循这一教导,用历史唯物主义的观点,把载人航天发展历史,同人类发展历史联系在一起和社会主义中国的建设历程联系在一起;用辩证唯物主义观点去分析发达国家发展载人航天的历程,研究它的载人航天发展目的、目标,途径,寻求其发展的内在规律;用辩证唯物主义观点分析我国发展载人航天的必然,以及优势和劣势,探讨在一个经济和技术基础都比较薄弱的发展中的中国,如何发展载人航天。

2. 用系统科学的观点和方法指导课题研究

"中国载人航天发展战略研究"课题,涉及面之广和深不是用一般的研究方法所能解决的。因此,必须以开阔的视野、多层次地用系统工程的观点和方法去分析研究和综合优化。

遵循钱学森院士所倡导的"综合集成方法",我们在研究载人航天发展战略上强调从整体上、系统上去研究问题和解决问题。首先从宏观上去研究问题的全局,在充分占有信息的基础上,形成总体框架;从总体框架出发,对每一个具体问题进行深入分析研究;对问题研究成果,不是 1+1=2 的简单地合成,不是从某一个局部的优劣来分析判断,而是从整体和全局去寻求最优途径。在系统上去进行 1+1>2 的综合集成。

3. 坚持客观性、科学性、针对性

软科学研究的命题是为决策服务的,要使研究的结果不但能为决策提供科学依据,还要受实践的检验。在研究过程中,要一切从实际出发,充分了解国际国内的发展状况,客观的揭示问题诸方面的内在联系和发展规律;敢于触及对立的观点和看法,敢于否定,敢于创新,做出准确的判断;既不抄袭,又不简单模仿得出科学的、明确的决策建议。

二、研究步骤

遵循上述指导思想,依据系统工程的观点和方法,采用综合集成方法进行研究,其步骤为:

1. 总体设计

依据命题将其诸多方面所涉及的各种约束条件以及内在联系(界面关系)进行总体分析,提出命题研究的总体框架,并将其分解成独立的分系统专题:为什么要发

展载人航天；国外各国发展载人航天的技术途径；我国发展载人航天的技术基础；我国经济发展与投资强度；我国载人航天任务目标；载人航天与政治、经济、科学技术和社会发展的关系；载人航天发展战略要素及其约束条件；载人航天技术发展战略、目标体系、技术途径；我国载人航天的总体发展蓝图。

2. 专题研究

对总体框架所确立的每一个专题从局部对问题进行研究，通过纵向的具体分析，得出相应的结论，以此作为整个命题综合分析的基础。

由于各专题所涉及的领域不同而采用不同研究方法。例如对“为什么要搞载人航天”这一专题。针对世界及我国对载人航天的不同认识和争论，其焦点在于：对载人航天的意义与技术途径的认识。

为此，我们全面分析各国是如何决策的、所采取的各种技术方案进行对比分析。摸清楚载人航天与政治、经济、军事、科技和社会的关系，以及各国选择载人航天方案的出发点。结论：人类进入第四活动域，是历史发展的必然。

3. 综合集成

在专题研究的基础上，着重从相互关系进行综合，优化，经综合集成，从而得出满足任务目标要求和全部约束条件，唯一的符合中国特定条件下的正确的结论，为领导提供一条可选择的决策咨询建议。

综合集成，主要从以下三个方面进行：总体——局部——总体；宏观——微观——宏观；实际——理论——实际。

在进行“中国载人航天发展战略”研究，首先从中国社会主义事业发展全局（总体），找准发展载人航天的位置（局部），再进行载人航天规划（总体）的研究；从宏观社会大环境研究载人航天的必要性，从微观研究载人航天实现的可能性，从而得出：中国载人航天要不要搞的结论；分析研究中国的实际（投资规模、技术基础、研制周期、人才结构等），通过对各种可能的技术途径进行理论分析，从而找出符合我国国情和国力的中国载人航天发展途径。

采用综合集成方法进行研究，结合本命题所要研究的内容，具体研究方法概括为：信息收集与独立思考相结合；实地调查与理论研究相结合；自然科学与社会科学相结合；宏观研究与微观研究相结合；定性研究与定量研究相结合；群体智慧与专家相结合。

（1）信息收集与独立思考相结合。载人航天发展的历史已近三十余载。各国发展载人航天的目的不同、道路不同、人们对这一问题的认识也不同。钱老在1987年1月5日国防科工委召开的首届航天领域情报分析会上，告诫我们：“要对各国发展航天技术的历史进行分析。分析这些国家走过的道路，总结他们的经验非常重

要，这个经验不仅是科学技术的，还有政治、经济，军事、国际形势以至于它本国人民的思想意识。总结到什么程度呢？我想就是要说清问题：前苏联、美国、日本为什么这样搞？西欧、法国、英国、德国为什么这样搞。要弄清楚他们什么作对了，什么做得不对。”

为此，我们广泛占有各类信息。并归纳为：国家决策文件、科学评论和新闻报道三类信息，进行分析研究。从而搞清楚了他们是如何决策的，采取技术途径的根由，社会反应的分歧焦点，为我们研究提供客观的依据。

同时，对美国的航天飞机、前苏联的载人飞船、法国（欧洲）提出要研制的小型飞机，以及德国飞机和英国提出的空天飞机方案，从技术层面进行分析、研究，从而得出我们的认识：美国的航天飞机是追求经济的天地往返运输系统的完全失败（每次发射费 5 亿美元），前苏联的飞船仍是今后一个时期有效的天地往返运输系统，法国（欧洲）提出的航天飞机方案不具有仿效价值，经济的、先进的天地往返运输系统尚待探索。

纵观各国载人航天技术的发展历程，并不存在一个必须遵循的统一模式。要根据本国的财力，物力和人力条件，以及传统优势、技术基础（包括技术储备、研制和实验设施、人才结构等）、国内外政治和军事态势等情况以及社会和经济发展的需求，来确定本国载人航天发展战略、任务目标和技术途径。

宏观地看，世界各国根据国家发展战略，在航天领域所采取的发展战略也有所不同。可概括为：超前型发展战略、平行型（或称同步型）发展战略、跟踪型发展战略和逆向型发展战略。

因此，我国航天高技术的发展，应以我国现实条件为基点，要根据我国国情、国力、科学地预测我国高技术的发展速度和可能达到的水平，来确定我国载人航天发展战略。

信息研究的目的在于借鉴，客观地进行分析，从而找出规律“借他山之石，攻中华之玉”。从中国的实际出发，选择中国载人航天发展道路，将立于不败之地。

（2）实地调查与理论研究相结合。研究中国载人航天的发展，离不开中国的国情实际。而要了解国情就得深入实际进行调查研究。

为此，我们对航空部、航天部的有关研究所和工厂进行了实地调研。通过与主管领导、专家座谈、讨论和参观有关科研设施、实验设施、生产设施，了解我国航空、航天技术基础、研制能力和人才结构的现状。

我国航天发展虽经 30 余年的努力，取得世人瞩目的成就。但我国的航天技术水平与国外还有相当大的差距。在这一技术基础上要发展载人航天，尚需创造必要的条件和攻克与载人航天相关的技术关键。何况，要发展类同法国提出的“航天飞机”，更无技术基础和可能。

从航空领域来看，我国的航空技术与国外的差距更大一些。目前我国尚不能独

立设计制造大型飞机，在此基础要发展空天飞机是不现实的。

通过对我国航天、航空现有的技术基础及可供选择的方案所需的技术要求，参考国外发展载人航天所采取方案应具有的技术条件和投资强度，进行量化对比分析、研究。从而得出：我国发展载人航天，既不能“走”美、欧的发展道路，又不能坐失良机的结论。只能选择一条适合中国国情、国力和技术基础，具有中国特色的载人航天发展途径。

（3）自然科学与社会科学相结合。载人航天技术是属于自然科学范畴，它的发展受到自然科学发展的制约。但是，仅从这一角度来研究载人航天发展是难以得出完整的答案。

纵观世界载人航天的发展，无论是前苏联还是美国，从20世纪60年代开始都把载人航天与争夺世界第一，作为冷战的筹码而发展，具有强烈的社会科学内涵。发展载人航天在某种意义上来说，是一种政治决策。

在研究中，我们将自然科学与社会科学结合在一起进行分析研究。

首先，着眼于我国载人航天发展战略的研究，遵循四个要素：认清国情及所处的环境是制订发展战略的基石；科学地预测未来发展是制订发展战略的前提；正确地总结自己的经验是制订战略的依据；借鉴世界各国发展载人航天技术的模式。

其次，要选择能够满足载人航天技术全部限制条件的制约因素：费用是制约大型系统工程发展的决定性因素；先进性和原有技术基础之间的抉择；正确处理好三个方面的关系：继承和发展、主战场与高技术、跨越研制阶段与循序渐进；满足全部约束条件的技术途径。

通过上述分析研究，使我们得出：任何发达国家对发展载人航天的决策，都不是单一因素作用的结果，而是对全球和国家战略宏观思考的结果。

（4）宏观研究与微观研究相结合。宏观研究的重点，在于论述：任务需求、任务目标，从发展的必要性角度来认识中国载人航天应确立的发展战略。而微观研究则着眼点放在：根据中国现有和预期可能实现的条件，从技术基础、投资强度、研制周期、风险分析等进行分析，选出适合中国国情、国力的中国载人航天发展的技术途径。

在进行对各种可能的技术途径研究中，着重从以下五个方面进行具体分析：任务目标的能力（技术性能）；关键技术及解决的途径；现有条件的适应能力和需要创造的条件；全成本费用分析；研制程序及周期。

在此基础上，将我国载人航天的任务需求、系统组成、研制程序、关键技术预研、经费概算于一体，最终可以绘出中国载人航天未来30年的发展蓝图，分三个阶段来实现：

在技术实验阶段：以飞船工程为重点，同时开展空间应用实验及关键技术“预研”。

在空间实验阶段:以有人照料平台工程为重点,利用飞船作为运输工具与平台结合在一起形成短期有人照料空间实验平台,开展空间实验。同时,开展第二代运载火箭的研制以及重大实验设施的建造;并积极探索未来经济的天地往返运输系统的发展途径。

在空间开发阶段:以建造完整的空间体系为重点,采取模块式空间站型式;利用飞船作为空间站的救生艇;选定一种天地往返运输系统开展研制;采用捆绑技术发展大型运载火箭和建造中国航天港。

由此可见,从宏观研究与微观两个不同的层面进行分析中国载人航天发展战略、目标体系和技术发展途径,使所得出的结论是客观的、科学的和现实的。

(5) 定性研究与定量研究相结合。在进行载人航天的天地往返运输系统方案选择中,我们把定性分析和定量分析有机地结合起来,进行多种技术途径的比较研究。

从定性角度看,多次重复使用的航天飞机具有技术的先进性。而飞船是一次使用,60 年代问世的技术。从定性角度飞船技术"落后"。但随着技术的发展,设计理念的更新,新技术、新材料的应用,今日中国要研制的飞船必然与以前的飞船有很大的不同。而且飞船作为运输系统使用,其主要要求是经济性,追求的目标是在可靠性的基础上降低运输成本。

在对不同的技术途径进行全成本定量分析中(全成本是指研制费、产品费和使用维护费等的总和)可以看出:在载人航天,年发射次数有限或年送入空间质量有限的情况下,飞船全成本费用是经济的。航天飞机只是在频繁发射和运送大量的载荷时,才有可能"降低"费用。

由此可以得出结论:美国的航天飞机技术先进而复杂、昂贵而脆弱,它既是一个示范,也是一个教条。航天飞机既是技术上重大的突破,也是追求经济运输系统的完全失败。而欧洲要研制的航天飞机其研制费约 80 亿美元,每次运行维护费为 1.3 亿美元(概算)。西欧所追求的本不是经济的运输系统,而是自主的载人航天系统。而且其技术实现的可能性尚存在着问题。也还有待时间的验证。

通过概念分析和量化比较,得出结论:纵观全局,在可供选择的四种技术途径中,能够满足约束条件的只有以运载火箭加定点着陆(一次使用或可部分重复使用)的飞船,作为中国载人航天发展的第一阶段的任务目标是现实可行的。

我们深刻地认识到:在进行软科学研究中只进行定量计算,停留在具体数值的层次上会迷失方向;而只停留在概念层次上又会失去比较的依据,只有两者结合才会得出符合实际的正确结论。

(6) 群体智慧和专家咨询相结合。科学技术的高速发展,使个人掌握其全部技术内涵的时代已经结束了。尤其是在进行重大工程决策研究中,涉及多学科、多领域和多层次,绝非一人所能完成。为此,在研究中采取下述模式:

分解课题—分工研究—集体讨论—综合集成—专家咨询—最终报告。这样做既充分发挥个人的才能和经验，又可充分发挥群体的智慧。为了避免局限性和片面性，在研究初步成果的基础上采取以下四种方式向专家们咨询：个别征求专家意见；组织专家座谈会；参加学术讨论会；向有关专家、领导汇报。

这样做的结果，就使其研究的结论，不局限在我们研究小组的意见，也吸收了专家们的意见。咨询过程既是交换意见的过程也是统一认识的过程。

三、研究结果

1986 年 10 月，在中国空间技术研究院召开的第三次空间站研讨会上，我们宣读了“我国载人航天技术发展途径探讨——兼谈飞船及其应用”一文，得到了到会专家们的赞许。这篇论文提出了研究我国载人航天发展战略的框架，并以此为基础，进行系统深入的研究。

1987 年 1 月 5 日，在国防科工委召开的首届航天领域情报分析会上宣读“对国外载人航天技术的剖析”其结论：“纵观各国载人航天技术的发展历程并不存在一个必然遵循的统一模式”。“根据本国的财力、物力和人力条件以及传统优势、技术基础、内外政治和军事等情况、社会和经济发展的需要，来确定本国的发展战略。”

1987 年 5 月，我们撰写“对载人航天技术的发展战略、目标体系和技术途径的思考”报告。这一报告引起航天界老专家们的高度重视，为此，我们专门召开了专家座谈会，听取意见从而更加丰富了我们对问题的认识。

1988 年春，在中国宇航学会第二次载人航天研讨会上，我们撰写并宣读了题为“对发展载人航天技术的再思考”的论文，作为“对载人航天技术的发展战略、目标体系和技术途径的思考”一文的补充。同年秋在中国宇航学会举办的航天战略研讨会上发表了“中国航天技术的发展战略”论文，同与会同志进行了广泛的讨论，分别征求了专家们的意见，从而使我们的论据更加充实。

1989 年 2～3 月间，我们曾分别向国防科工委领导、国防科工委科技委专家们和航空航天部领导、机关领导及科技委专家们，汇报了：“中国载人航天发展战略（不能不搞、不能大搞、飞船起步、平稳发展）”和“中国载人航天三十年发展蓝图（设想）”。经讨论取得了共识。

1989 年夏，向国家航天领导小组及钱老呈报了我们撰写的报告“为占据人类第四活动领域一席之地而奋争”。此报告得到了专家们的肯定与高度评价。

1990 年 5 月，应国防科工委领导提议：“对各国为什么要搞载人航天和所采取的发展途径，再作进一步研究”。为此，撰写了“为什么要搞载人航天”的长篇研究报告。报送国防科工委领导、国家专委各位委员，呈送李鹏总理。

1990 年 6 月 18 日，历经 4 年最终所完成的“中国载人航天发展战略（系列研究

报告)”在国务院发展研究中心马洪主任主持下,召开了有社会科学界和航天界的专家们参加的鉴定会。

鉴定意见如下:

“中国载人航天发展战略(系列研究报告)”简称“报告”,是紧紧围绕着我国载人航天要不要发展及如何发展这个争论多、又迫切需要回答的战略问题而开展的一个重大软科学课题;是一项涉及国家政治、经济、科技、军事、外交、社会等诸多方面的研究;同时还是要对载人航天技术发展历史做出评价、对现状做出判断、对未来做出预测,并对中央进行决策提供咨询建议难度极大的课题。

该项研究历经4年,在充分占有资料和深入调查研究的基础上,运用辩证唯物主义观点,采用系统工程定量与定性相结合的软科学研究方法进行综合分析研究,系统地分析了世界载人航天技术发展的经验与教训,并结合全球和国家的战略方针,从不同的角度,不同的侧面和层次回答了:“我国为什么要搞载人航天”和“怎样搞载人航天”,以及“应采取的发展战略,目标体系和技术途径”。“报告”论据充分、分析透彻、观点明确、针对性强、有说服力,是工程科学与经济科学相结合的一个典范。

“报告”所提出的关于中国载人航天“不能不搞、不能大搞、飞船起步、平稳发展”的战略思想及将任务目标分阶段来实施的发展思路,在一、二阶段明确显示了中国载人航天发展蓝图。这一研究不追求单项技术先进性而求整体优化的技术途径等一整套战略原则,都是从全局和21世纪初,直到中叶中国要在世界上具有大国地位来考虑的,是建立在以低投入为特征,且在技术可行、经济上可以承担,综合效益好,符合中国国情,国力的合乎逻辑的选择。报告提出了一条我国如何走自己开拓宇宙空间的发展道路。

“报告”中关于载人航天发展中的一些具体问题还应不断地深化和完善,对载人航天的应用方面还应进一步地论述。

该项研究成果能够不失时机地为中央和决策领导部门提供咨询意见,为国家宏观决策提供了重要的科学依据,起到了软科学研究为宏观决策服务之目的,是一项成功的高水平的软科学研究成果。

1990年11月将“中国载人航天发展战略(系列研究报告)”由国务院发展研究中心马洪主任题词(发展航天事业,加强国力建设。1990.10.25)和航空航天部高级顾问任新民院士题词(群策群力,开拓中国航天新纪元。1990.11.15),呈送中央政治局及李鹏总理。

1991年3月15日下午2~5时李鹏总理听取了我们对“中国载人航天发展战略”研究结果的汇报。李鹏总理讲:“我赞成先从飞船搞起。我们的目标是有限的,基点还是自力更生为主”。

1993年“中国载人航天发展战略(系列研究报告)”获国务院发展研究中心的部

级科技进步一等奖。

1995 年“中国载人航天发展战略——软科学综合集成方法的实践”，荣获国家科技进步二等奖(序号 135，编号 19－2－003)。

实践证明：我们按钱学森院士所倡导的“总体设计”思想和“综合集成”方法，进行的中国载人航天发展战略研究所取得的成果，集中体现了中国自然科学界和社会科学界对发展中国载人航天的认识和对其技术发展途径的确认：“面对世界载人航天的挑战和机遇，中国载人航天不可不搞，也不能大搞，飞船起步，平稳发展万无一失。盲目赶超或急于缩小差距均将陷入困境，疑虑过多以至坐视不顾，也会失掉机会和希望”。

四、认识与体会

实践结果表明“中国载人航天发展战略”研究的结论是正确的。所以能够取得这样的成果表明所采用的研究方法是有成效的、科学的。通过这项研究工作，我们体会到：

(1) 综合集成方法是研究复杂巨系统的科学方法。

我国著名科学家钱学森院士，1990 年在《自然杂志》发表的“一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法”和于景元同志 1993 年在《中国软科学》发表的“从定性到定量综合集成方法及其应用”等论著中指出“综合集成方法是软科学研究的科学方法”。通过“中国载人航天发展战略”研究的实践和所取得的成果再一次证明：定性定量相结合、综合集成的方法是进行复杂巨系统决策研究有效的科学方法。

(2) 重大工程立项，必须进行决策研究。

在进行巨系统，甚至是复杂巨系统的工程的决策过程，为避免决策失误，应采取“定性定量相结合的综合集成方法”进行研究，为正确决策提供科学依据。

(3) 综合集成方法的应用，要在不断实践中前进。

我们在运用钱老提出的“综合集成方法”研究“中国载人航天发展战略”的成果，为国家决策提供科学的符合中国国情的咨询建议。实践证明：用该方法研究所得出结论的正确性。

钱老后来进一步提出了“从定性到定量综合集成方法”，我们要不断地通过实践去学习和总结，以促进其在决策研究中发挥更大的作用。

参考文献

[1] 钱学森：《论系统工程》，湖南科学技术出版社，1988 年

[2] 钱学森、于景元、戴汝为:“一个科学新领域开放的复杂巨系统及其方法论”,《自然杂志》,1990 年 1 期

[3] 于景元:“从定性到定量综合集成方法及其应用”,《中国软科学》,1993 年

群体研讨环境研究及其应用*

唐锡晋

中国科学院数学与系统科学研究院，北京，100080

面向开放复杂巨系统问题的综合集成系统方法论，在实践上如何支持定性综合集成，从而对问题展开进一步探索是综合集成研究的一个重要方面。日常中的各种群体研讨活动，如讨论班、专家会议、学术会议/论坛，乃至目前延伸出的各种留言板(BBS)和博客等不同程度地体现着通过发散型群体思考来集思广益以获得开拓性的思路或者创意(idea)的目的。事实上，研讨活动本身就是一种合作问题求解方式，尤其是一组不同领域或者技术背景的成员(专家)针对复杂棘手问题而进行的研讨活动。有关研讨的支持，其中知识收集、产生、共享和应用的支持是知识管理的基本功能；但更高级的支持功能体现在对群体研讨过程全方位的有效支持，特别是促进研讨互动、思想交叉与融合，将参与成员的"意会型知识"转化为"言传型知识"，集专家智慧得到有关议题的一些概念或者认识，从而获得定性的综合集成。有关这方面的研究在20世纪90年代以来已成为群体支持系统(GSS)的一个重要方面，其研究发展着重了对群体活动过程如研讨(argumentation)、辩论和问题结构化中有意义的工作的支持，代表性的方法及相应的工具有 Dialog Mapping (美国)，Cognitive Mapping (英国)，Augmented Informative Discussion Environment (AIDE) (日本)，等等。这些工具不同程度地反映了人们更注重研究如何支持群体产生创意，特别是针对复杂问题或者恶劣(wicked)问题首先想出智慧点子，如采用智暴、思维关联映射和投票等方法获得关于问题的宏观的想定，并逐步引导深入的分析和论证，诸如采用 Dialog Mapping 等支持，通过辩论等达成行动的共识；正体现了非结构化问题逐步结构化的过程[1]。这其中，如何有效支持群体互动而产生创新性想法与思路是研究群体工作支持工具最主要的难点之一，也是创造力支持系统(creativity support system)的研究内容之一。CSS可看成为GSS上的一种扩展。

本文首先简要评述创造力支持系统的研究，描述了自主研发的群体研讨环境(GAE)支持研讨过程的一些独特功能，介绍了利用香山科学会议网站上的公开内容、结合GAE目前的功能所进行的一系列尝试，展现GAE帮助专家扩展思维空间、激励研讨的深入、对研讨结果的初步总结、评判研讨成员的参与以及寻求非结构化

---

* 国家自然科学基金项目(70571078)和"不确定决策"创新群体项目(70221001)。

问题的某种结构等的设计思路,最后讨论了若干值得继续深入的方向。

一、创造力支持系统与群体研讨环境

创造力支持系统是一种基于计算机系统,支持激发个人及团队潜能以期获得创造性产出。信息与媒体技术的革命性进步为CSS的研究与突破性应用。但对创造力,特别是团队创造力的激励水平不仅仅依靠这些技术元素,更需对创造力及创造过程的主要源泉有深刻的思考。这方面的研究工作主要集中在心理学与社会学领域,我国则倡导了思维科学的研究。钱学森开创了思维科学这一研究领域,提出了大成智慧工程,力图达到宏观与微观的统一[2]。"综合集成研讨厅"(Hall for Workshop of Meta-Synthetic Engineering)是大成智慧工程中一个概念,体现为一个人机结合的信息处理系统、知识生产系统和智慧集成系统,期望有效地利用以人的经验为依据的直感思维与启发知识,由经验加学习获得新的知识[3]。集智慧之大成的综合集成研讨厅实则即是一种知识创造场,研究并实现综合集成研讨厅的工作也可视为研究如何支持有效的知识创造场的动态生成和运行的工作[4]。为此我们做了一定的探讨,开发相应的支持工具的雏形,也开始面对一些基本问题,如研讨厅中知识的生产过程的模型是什么?智慧涌现的机理是什么?怎样促进知识创造和智慧涌现?其环境机制是什么?等等。目前国内有关成果尚缺少对这些问题有充分的解释,缺乏论据充分的机理模型来支持计算机建模;某些研究尽管有了一些基础模型,实现了相应的计算机支持,但缺乏实验验证,无法形象演示专家研讨智慧生成的过程,切实体现人机结合,以人为主,机器对人的思考的帮助,因而同样缺乏说服力。事实上,支持工具(包括人机界面)与使用者的创造活动之间存在天然的鸿沟,即便是人类设计的支持工具,弥合鸿沟的关键在于如何按照人自身的创造活动,考虑工具设计或改善已有的设计,这需要确认不同规模的人的创造活动机理。针对尚缺完善的理论模型的现实,考虑一种自底向上的研究模式,研究如何通过互动激励专家研讨、交流思想和知识等这些创造过程中的部分活动,而不是全部。这样便首先围绕CSS展开研究。

(一)创造力支持系统

CSS设计一般基于一种创造力模型或者方法(如基于智暴方法、日本学者川喜多二郎的KJ方法),近来更多的CSS的研发一般基于综合多种创造力模型或者创造技法的基础上提出的新框架,文[5]介绍一些创造力模型及对应的CSS。世界各国学者对CSS研究均有重要贡献。美国学者B. Shneiderman根据一些创造力研究抽象出了包括收集(collect)—关联(relate)—创造(create)—分享(donate)四类活动的创造力框架以便于创造力支持软件的开发,并概括了相关的8项适合研发软件以

支持创造的任务：搜集（searching）、可视化（又可理解为直观化，visualizing）、咨询（consulting）、思考（thinking）、探索（exploring）、创作（composing）、回顾与评价（reviewing）与传播（disseminating）[6]，也有与其工作互有影响的一些有关创造力支持应用的讨论[7]，文[8]根据这一框架评述了欧美若干有代表的创造力支持软件。在亚洲，日本学者通过近20年的研究推动使CSS逐渐成为一个体系。日本的智能信息处理和人工智能等领域的学者结合本国学者提出的创造技法，研究了针对不同创造技法和任务的CSS，近年来更是在人机交互方面充分利用了不断涌现的先进的信息与通信技术，强调帮助用户感知并意识到可能对其工作或问题解决有用的信息（问题的解答、线索等等，相当于awareness），从而实现"推送"式的帮助，这同时反映了日本在智能信息处理领域的优势和对原CSS改进的趋向。不过这些CSS中深入的信息加工大多基于KJ法或相应扩展，相对于其人机交互手段的多样化，在深入的统计分析与处理方面则逊色不少。台湾学者在CSS研究方面也有近似的探索。我国则在GSS与知识管理方面有不少研究，但针对知识创造与创造力支持工具研究本质上很少，其中典型的工作则从思维科学以及综合集成研讨厅的角度开展[9]。

CSS的研究需要实践来推动。目前应用多体现在教育领域和公司研发机构中的一些应用，有关CSS的评估大部分来源与一些案例或测试实验，专门讨论支持技术与支持个体或者群体的创造性活动以及如何扬长避短发挥工具优势的研究也持续着[10]。CSS的发展可以体现在更先进也更贴近生活的人机交互技术和信息处理技术（包括各种mining技术）上的提高，但更需要完善的理论模型或者方法论作支撑，也需要有可重复、可验实的工作。研究综合集成是一个切入点，特别是研究如何支持性智的涌现。下面介绍群体研讨环境的研究。

（二）群体研讨环境

"群体研讨环境"（group argumentation environment，GAE）是一个辅助群体思考的分布式计算机平台。通过GAE支持研讨过程，群体成员可能达成一定共识（common grounds）进而创造出新的知识，甚至智慧，并为个人所理解，吸收，激发新一轮创造性思维，如此往复。GAE可视为一种GSS或者CSS，也是HWMSE雏形的一部分，其设计上注重体现"人机结合，以人为主"的理念思路，考虑了GSS/CSS研究的趋势，主要围绕对获取的研讨信息的深入加工处理。GAE基于电子智暴方法支持群体思考，构建了智暴研讨室（brainstorming argumentation room-BAR）。注册用户通过类似于一般上网聊天的方式选择主题，登录进入相关研讨区，展开对关注议题的讨论，每句发言需要输入一句话以及一组关键词，关键词代表idea。与一般聊天室或者GSS不同，GAE有以下一些有特色的功能：

1. 对研讨过程的支持角度

群体思考关联可视化。通过一种多尺度统计分析方法，将参与人员的发言进

行了分析处理并将结果可视化，如将研讨者(ID)以及发言的关键词的复杂关联关系映射到二维空间。随着发言的不断增加，关联在变化，二维投影也随之而变。BAR将研讨过程可视化地展现出来，以帮助参与者感受研讨的演化，便于其记忆与理解，如对关注热点、孤立点等一目了然，并获得全局概貌，从而展开联想、深入思考。2维空间关系也体现了对当前研讨议题的一种结构关系。此功能借鉴了日本ATR研制的AIDE的设计思想[11]，并根据定性综合集成、寻求问题结构的目的作了改进。

过程追踪。基于研讨过程所获得的研讨信息，GAE－BAR提供了有关研讨过程与研讨结果的各种分析支持，如历史回顾，可选择研讨片断(按时间)或部分研讨人员组合(按人物)可视化地展现局部的关联，帮助用户分析不同阶段或小群体的研讨及与全局的关系，透视研讨过程中对研讨议题的不同角度的理解。该功能特别有助于用户作案例分析，通过关于研讨“历史剪辑”体验当时的研讨过程，若结合发言人的背景深入剖析可挖掘蕴涵的信息，觉察相同群体形成不同认识的原因。

引入可视化的功能是期望研讨人员在GAE支持下的一个人机结合所构成的创意制造场中积极思考与互动，涌现出更多的创意火花，激发出更深的见解与认识，过程追踪也是一种思考情境感知(thinking context awareness)的辅助手段。

研讨干预。当研讨过程陷入停滞时，系统以虚拟成员的身份主动发言，激发参与人员思考、发言，以利于研讨顺畅开展，在有限的时间内获得较高的产出。

目前GAE支持发散性群体思考活动，执行研讨干预的虚拟引导员(facilitator agent)的干预策略是选择整个研讨过程中被提及次数最少的关键词(若次数相等，则随机抽取其中一个)，以扩展思考空间。这里不是由研讨主持人通过直接要求来掌控研讨进程(如对本议题的所有在线参与成员发送消息，请求大家多发言)，而以一种不易为人所察的方式，通过参与研讨的发言试图引导、激励参与成员的新发言，该解决研讨停滞问题的思路体现了一种软控制的思想，是一种自主计算的问题解决模式。

2. 研讨成果分析

发言贡献评价。考虑研讨成员之间根据所贡献的关键词的相同或相异而构造对应的一致性或差异性矩阵，通过计算矩阵的最大特征根所对应的特征向量获取对发言人的排序，从不同角度评价用户对研讨的贡献[12]。

发言相似组(affinity diagramming)。根据发言与发言人的关联，对可视化视图的空间作切分，落在同一单元内的发言属于同一组，这样借鉴KJ法的思想，获得了相似发言组，实现了发言的初步聚类。若考虑每一组发言代表研讨问题的一种视角，那么所获得的这些相似发言组也可视为关于该问题的多个视角，从而揭示了若

干内在的结构信息。每一组中发言数量也是一种发言集中度的体现。

关键词聚类与概念提取。根据关键词在可视化视图的空间分布,采用K-均值算法对研讨过程的关键词作聚类分析,利用质心的定义,对每一关键词簇提取质心最近邻的关键词作为该簇的代表,该关键词可被理解为该簇关键词凝练而成的一个概念[13]。

发言相似组与关键词聚类均是计算机对研讨结果的处理,分析人员可在机器初步加工基础上进行深加工,如合并一些发言组、修正簇的名称,从而做出精炼而确切的研讨总结。

3. 信息视图与主动或增强的信息支持

信息视图(information view)。链入一些常用搜索引擎(如Google,百度),研讨人员从研讨过程记录下来的已有关键词列表选择感兴趣的关键词,发送到关键词输入区,启动嵌入的搜索引擎从Internet上查找相关的信息,这样获取的信息方式是研讨人员使用通用信息搜索工具拉拽(pull)而得。

主动(active)**或增强**(augmented)**信息支持**(information support)。此功能独立于GAE－BAR,是一个称之为AIS-GAE的信息支持工具。其原理是通过Web挖掘与文本挖掘技术,具体设计实现了网络爬虫、索引程序、自动文摘和搜索引擎等,针对特定的网站或者对象,如香山科学会议,建立了个性化搜索工具,为用户提供积极的信息支持,甚至是推送式(push)的信息服务。其详细设计及实现可参考文[14]。

4. 创意视图(idea viewer)

出现在同一句发言中的关键词组可视为是该句发言的代表,考虑关键词对应一个节点;当两个关键词同时出现在一句发言中则两词间存在一个连接,其强度(权)为两者同现的频度。这样每一句发言对应了一个关键词完全图。将一个研讨过程所有发言的关键词完全图叠加在一起,即获得一个关键词网络。这是一个无向加权网络,为该研讨主题的知识点的拓扑结构图,从中可提取一般网络的一些特征元素,如组元(component)、割点(cutpoint)和子群(subgroups),也可获取一些结构关系[15]。

由此作进一步推广,考察一个科研项目、一个团队/群体乃至一个学科的学术活动,若视发表的一篇学术论文为一句发言,考察的所有论文之关键词集构造生成的关键词网络即反映了所考察对象的研究内容或者知识视图;若结合时间因素,该网络为考察研究进展也提供了一种视角,向观察员展示了是采用什么样的知识和结构来诠释研究主题的。目前该功能正在开发成为一个独立工具称之为iView。

下面结合以上功能介绍GAE有关香山科学会议的一些应用。

二、群体研讨环境在香山科学会议的应用

香山科学会议本质上可视为一种跨学科研讨，针对某类问题邀请多个领域专家进行讨论，并有可能多次举行。经过10多年的发展，她已成为一个激励群体互动、知识共享与创造的平台，集聚了丰富的成果。其开放宽松的会议方式实则鼓励参与成员发散型思考，特别适合作为GAE的试验和应用对象。本文根据香山科学会议网站(www. xssc. ac. cn)上的公开内容利用GAE作了如下一些尝试，具体为：

(一)结合若干主题，如"复杂"，"脑、意识和智力"等抽取有关会议，模拟研讨过程，利用GAE对群体发言信息进行探索式的分析

尝试以专家的报告题目和主要的问答记录为蓝本构造对应的研讨内容表，发言次序按会议的时间顺序以及每次会议上的报告顺序。通过GAE，将专家的关注点或者兴趣点可视化表征出来，考察研讨关注内容，分析研讨结果，并进行初步的聚类。这里以有关"复杂"的研讨来举例说明，关于其他主题的试验可见文[4，15～17]。表1列举了从历次香山科学会议中抽取的以"复杂"为主题的香山科学会议，共7次。某些会议虽然名称与"复杂"有关，因网站上没有具体内容，故未考虑。

表1　抽取以"复杂"为主题的香山科学会议列表

会议序号	议　　题	召开时间
20	开放复杂巨系统方法论	1994年6月20～23日
29	自然控制论的理论方法和重大科学问题	1995年3月29～31日
68	开放复杂巨系统方法的理论与实践	1997年1月6～9日
110	控制论与科学技术革命	1998年12月22～23日
112	复杂性科学	1999年3月18～20日
190	过程工程中的复杂系统	2002年9月17～19日
227	系统、控制与复杂性科学	2004年5月25～27日

试验时以"复杂"在GAE中创建议题，研讨表则人工填写，其中为每句发言指定相应的关键词，因此只有通过过程追踪观察研讨过程的演化了。图1(a)是GAE客户端的主界面，其左上区域是信息区，记录研讨过程的所有事件，如用户登入和退出及发言等；左下区域是交互区，用户在此输入发言和关键词，关键词录入栏右侧为关键词提示列表，便于用户从以往的关键词中选择，当同一句发言中多次选择某一关键词，则实际增加了该关键词的权重。视窗右部为GAE-BAR的特色——共享的可视化视图区，用户可选择显示关键词-发言人的公共视图(common view)、发言-发言

人的个性化视图(personal view)或者信息视图(information view),图1(a)中显示的是公共视图。图1(b)则是关键词首提者信息,也统计了每个关键词在统计时刻之前的整个研讨过程中被提及的次数,使用最多者在一定程度上多少反映了该词(或者该想法)受人关注的程度。

图1(c)为关键词聚类,选择簇的个数为4,即$k=4$,得到代表性关键词为“生命起源”(簇1)、“螺旋”(簇2)、“多尺度”(簇3)以及“人工智能”(簇4),它们分别对应了4个关键词簇表,表中列出了该簇所含关键词及其出现频率。此处的4个簇可理解为研讨专家对于“复杂”研究的4个方面的视角,而计算机给出簇的代表性关键词可作为这些视角的名称。

若结合发言人,如图1(d)可以看出:专家“李静海”、“白以龙”关注了“多尺度”簇所代表的研究;专家“汪云九”、“郭爱克”关注了“生命起源”簇所代表的研究,而更确切地可理解他们代表了“脑与意识”研究;其他的研讨专家则更多关注了簇“人工智能”和“螺旋”所代表的研究,更确切地是从“复杂系统”、“复杂性”、“系统方法论”等角度研究。这样做进一步审视,可更确切地给簇命名,而这些通过研讨所会聚的创意并提升出的概念即是视角,此外还得到了关注不同视角的专家小组。

获得适当的簇数一般需要反复测试。图1(c)中,簇2与簇4比较靠近,单独挑选关注着两个簇的一些专家,利用研讨过程追踪功能,察看他们与其对应关键词的空间分布,如图1(e)中显示了更关注有关“控制”和“计算机”等相关内容及其关注人员,显然该图的布局与图1(d)中簇2与簇4的空间分布明显不同,这样又能细分出一些研究视角。结合实际情况,可发现研讨过程中依据关键词的聚类基本准确反映了其中的关联事实,而且聚类结果也体现了香山科学会议近10年来讨论“复杂”的各个不同的领域和角度。这样的方式可帮助研讨人员乃至会议组织者察觉我国“复杂”研究的不同侧面,追踪研究的发展态势,发掘领域专家;也是对今后与该主题密切相关的会议发起人和申请评议人员的一种,以求会聚多方思想。

以上仅仅是一种解释。事实上,研讨参与成员的个体差异一般导致对相同的可视化研讨图有不同的理解,GAE的功能正是激励更多创意的产生,了解参与成员的知识视角,探测出对问题的一些结构信息。

(二)针对参与模拟研讨专家的发言,通过相应计算考察其参与程度,分析其知识专长

本试验选择设计了17位专家总共有46句发言,生成利用前面所谈及的一致性和差异性矩阵,计算矩阵的最大特征根所对应的特征向量,得到一致度和差异度,表2是具体的结果,包括每个向量值及前5位的排序。



Keywords	UserID	First Time	Refer Count
开放	王浣尘	1994-06-20 16:46:53	9
多层次	成思危	1999-03-18 16:42:53	1
复杂科学	成思危	1999-03-18 16:42:53	3
非线性	白以龙	1999-03-18 16:44:53	1
人工智能	张 钹	1994-06-20 16:48:53	4
人工生命	张永光	1999-03-18 16:45:53	2
认知	汪云九	1998-12-22 16:46:53	2
脑	汪云九	1997-01-06 16:46:53	4
演化	方福康	1999-03-18 16:47:53	1
经济系统	方福康	1999-03-18 16:47:53	3
螺旋	王浣尘	1994-06-20 16:46:53	2
虚拟研究所	成思危	1999-03-18 16:49:53	1
分析	李静海	2002-09-17 16:42:53	1
关联	李静海	2002-09-17 16:42:53	1
描述	李静海	2002-09-17 16:42:53	1
多尺度	李静海	2002-09-17 16:42:53	3
复杂系统	王浣尘	1994-06-20 16:46:53	15
系统科学	顾基发	1994-06-20 16:44:53	5
复杂性	戴汝为	1998-12-22 16:43:53	10
过程工程	白以龙	2002-09-17 16:45:53	2

图 1　GAE 功能略图

(a) BAR 客户端布局；(b) 关键词首提者；(c) 关键词簇表；(d)研讨聚类分析；(e) 过程追踪

表 2 关于 17 位参与成员参与程度的评测

一致性矩阵的最大特征根所对应的特征向量： 前 5 名： 指标的含义：	(0.0952，0.5795，0.0979，0.3114，0.0363，0.0712，0.1447，0.2049，0.3348，0.4596，0.0964，0.0412，0.0446，0.3449，0.0896，0.0408，0.1196) 戴汝为 > 于景元 > 张钹 > 宋健 > 成思危 表明参与人员在研讨过程中与其他成员之间有更多的共同关注点
差异性矩阵的最大特征根所对应的特征向量： 前 5 名： 指标的含义：	(0.3075，0.3288，0.2724，0.2888，0.1848，0.1882，0.1905，0.2184，0.2381，0.2594，0.1630，0.2679，0.2347，0.2229，0.2464，0.2557，0.1813) 戴汝为 > 李静海 > 成思危> 白以龙 > 汪云九 表明参与人员在研讨过程中与其他成员相比有更多的与众不同的关注点

表 2 中“戴汝为”两项排名第一，与其多次担任会议主席密切相关。有必要指出：这里的一致性程度和差异性程度两个指标是一种评测而已，一致度高说明在所考察的研讨过程中所对应的参与成员与其他成员之间有更多共同的关注点，并不一定说明参与者人云亦云，需结合关键词首提者来具体分析；差异性程度排名靠前说明发言人在本次研讨参与人员中与其他成员相比有更多的与众不同的关注点，发散型思考正是鼓励贡献更多不同的创意，展现出对问题思考的不同视角。不过具体的分析与解释需要考虑具体的研讨主题和研讨过程。排序从某种程度上也反映发言人在发言过程的“地位”，而这也与发言人的知识专长密切相关。

（三）通过 Web 文本挖掘技术，为香山科学会议各种用户提供帮助

GAE—BAR 中的信息视图可满足研讨参与人员信息搜索的一般需求，AIS-GAE 通过应用 Web 文本挖掘技术，实现了针对香山科学会议本身的信息搜索引擎，并具有信息推送功能。AIS-GAE 可独立工作，旨在为更多的人员，尤其是香山科学会议相关用户（如与会专家、会议申请人员、评审专家、会议组织者等）满足更多的信息需求。对于与会专家、会议组织者、会议协调人员、评议专家乃至理事会负责人员，通过 AIS 搜索可获取以往相关会议的详细信息，特别是一些相关专题在香山科学会议上讨论的历史记录。

图 2 是 AIS—GAE 的交互界面，类似于一般的搜索引擎。使用时，用户输入关键词，如“复杂”，或者由 GAE 中信息视图推送关键词，从而启动 search，搜索结果显示在搜索栏的下方，包括搜索结果的统计和按与设定关键词相关性的高低而排列的搜索到的文本，其中每一条信息显示了查找到的 URL 地址、文件标题、文件中评分最高的句子和察看文摘的链接。用户可根据各自需求与兴趣，结合文摘信息，选择



图 2　关键词高亮显示的页面摘要

是否再细看。这样的搜索对了解关于“复杂”专题以往的研讨重点，申请与评议新的会议提供了一定帮助。它一定程度替代在香山科学会议网站上直接的搜索，帮助专家花费较少的时间掌握大量的信息。如评议人员在面对一个新的复杂系统与复杂科学的会议申请时，通过 AIS－GAE 搜索，总共查找到 87 个与“复杂”相关的香山科学会议网页。考察排列靠前的相关条目，第 4 条是 1994 年 6 月香山科学会议召开了一次题为“开放复杂巨系统方法论”会议的简要介绍，第 1、3、5 条都是关于 2004 年 5 月召开的题为“系统、控制与复杂性科学”的会议。单从文摘信息所反映的内容，说明了两次会议的侧重很不一样，1994 年的会议着重讨论研究复杂巨系统问题的方法论即综合集成方法论及其具体实践，而 2004 年的会议着重点在复杂系统与复杂性科学的多视角研究。查看摘要的链接指向按照原文 10％的比率生成的摘要，

其中高亮显示了查找的关键词。通过考察以往历次会议，勾勒出相关学科前沿研究的国内现状，体现了 AIS—GAE 对评价当前申请一种有效的信息支持。

（四）根据 AIS-GAE 对会议总结文件的结构化处理，实现信息推送，构造活动网络，结合第 2 点深入评估参与成员以及个人对群体的影响，进一步挖掘会议参与成员的角色作用

GAE-BAR 已对参与成员进行了一些评测，并根据其研讨贡献的内容（关键词）聚类而获得与会专家的一种聚类。AIS-GIS 特别针对香山科学会议网页抽取了特有信息——与会人员名单，并将历次会议的名单汇总，形成一个与会人员信息表，从而展开更多的信息支持。如评议一个专题为“复杂”的会议，通过查找而得到的以往历次与“复杂”相关的会议参加人员表，对照新申请的会议邀请人员列表，可帮助会议评议人员和协调人员判断会议参与成员知识结构、年龄结构和机构分配的合理性。

AIS-GAE 搜索引擎执行搜索任务时，根据与会成员信息表，判断所搜索的关键词是否为与会专家。若是，则将信息表中的专家信息推送给用户。图 3 中输入搜索的关键词为“于景元”，AIS-GAE 检测出这是一个人名，故在输出相关搜索页面的同时，推送了其参与香山科学会议的历史信息，如图 4 所示。

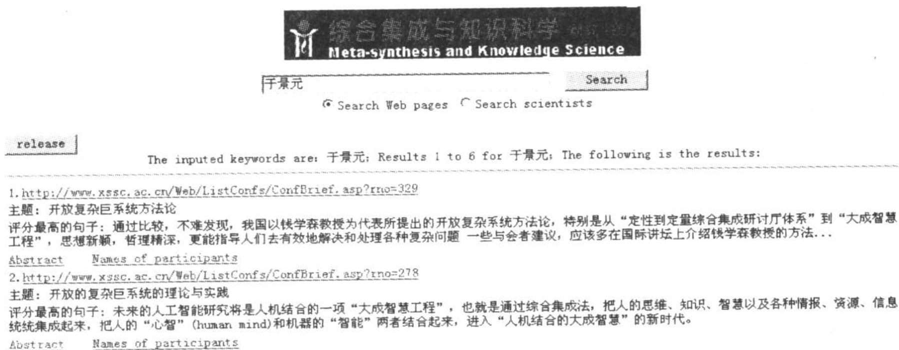


图 3　使用 AIS-GAE 为香山科学会议定制的搜索引擎在内容中搜索人名

根据信息表统计与会人员对于某类主题相关会议的出现频率，相对高频出现的人员一般可视为有关专题的权威或者活跃人员。更进一步，还可构造基于各种关系的人际网络，如对参与相同会议的人员构造人际网络，human activity neework 一个会议的所有参与者形成一个完全图，相关主题的所有会议的完全图叠加构成一个复合人际网络，分析该网络特征，可获取更多深入信息，如此分析结果比直接的统计结果更能挖掘隐含的关联模式，如发现其中有影响的发言人或者“关键人物”，可视为该主题研究的权威或者代表人物（gatekeeper）。

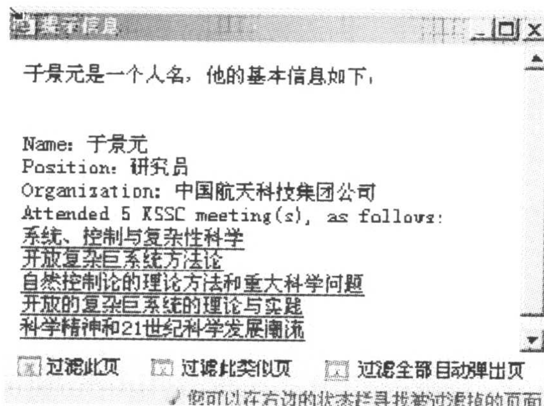


图 4　AIS-GAE 推送具体会议信息

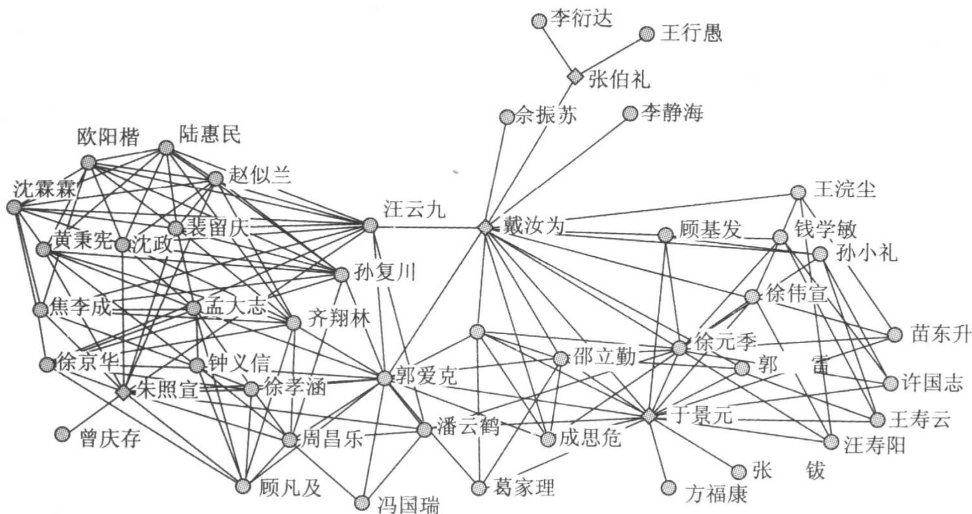


图 5　一同参加两次以上复杂相关会议的专家所构成的社会网络（◆代表割点）

根据 AIS-GAE 所搜索到的 10 次与“复杂”相关的会议所挖掘的与会人员信息表，若专家 A 与专家 B 同时参加了其中 2 次以上（含 2 次）会议，以节点表示专家，则专家 A 与专家 B 之间存在一个连接，连接强度为 2。扫描信息表所有与会专家，生成一个专家活动的社会网络，如图 5 所示，其中的割点所对应的专家分别是“戴汝为”、“于景元”、“张伯礼”和“朱兆宣”，体现了 4 位专家在“复杂”相关会议中的重要作用，如前两位专家多次担任会议主席。若辅以 4 位专家的背景也可理解为他们是“复杂”研究不同学派的代表人物。

（五）通过“关键词网络”考察特定领域的研究状况

图 6 是根据 GAE-BAR 有关“复杂”的研讨内容所呈现的关键词网络，即 idea view。这个网络是全连通的，只有一个组元，有 5 个割点，分别是：“脑”、“系统科学”、“控制论”、“开放”和“复杂系统”。此处关键词割点可理解为不同关键词组之间的桥梁，即可视为这些会议研讨的核心点，或更进一步反映了研讨中各视角或者学科的交叉点，但并不代表只有 5 个学科交叉。对比一下 GAE-BAR 的关键词聚类分析，可体会不同的含义。目前的关键词聚类分析是在相关分析基础上按 K-均值聚类。不同的聚类算法结果会有不同，也需要研究比较一些聚类算法。而这里割点是依据一个拓扑形式的网络而得到。一旦网络确定，割点即确定。也可做些互动式分析，如考虑网络的子群。图 6 是利用 Ucinet 软件（ver 6.59）中 NetDraw 功能（ver 1.38）子群计算的算法之一 Newman-Girvan 算法而得到有关关键词网络的 7 个子群，算法原理见文[18]。选择子群数目为 7 是根据 Newman 所给出的最佳聚类的模块（modularity）函数在子群为 7 时取值最大而定。这样的分析对确定有关“复杂”研讨内容的一个恰当的视角数目有所帮助。

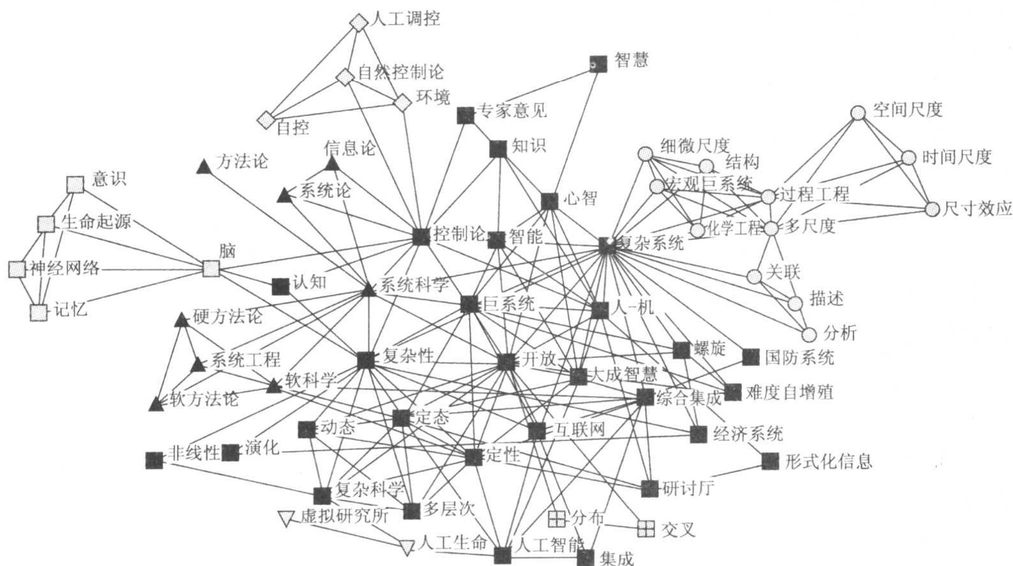


图 6　复杂相关会议的关键词网络（有 7 个子群）

以上所介绍的这些利用各种挖掘技术而获取的信息可帮助香山科学会议评议人员、协调人员以及理事会负责人员客观审视与会人员组成，了解目前国内有关主题的研究力量的一些变迁和现状，为贯彻香山科学会议的宗旨、拓广科学前沿问题探讨的广度与深度、改进具体会议的人员配置等具有更加有意义的支持与帮助。

再次值得一提的是，本文举例的会议都已经开过，故 GAE-BAR 中研讨发言均来源于会议总结中所描述的报告题目或主要的问答、评论内容，关键词也由试验人员确定，自然一些现场的活跃因素很难表达出来，关键词的选定方面也不一定很准确。利用 GAE 所做的这样一个事后分析，已探测到超出一般会议总结的内容。有关虚拟引导员的示例可参见文[15,17]。期望利用 GAE 提取专家发言和整个讨论所蕴涵的丰富信息，以促进对相关结果的理解与合理使用，如对参与成员的评判，一些先端科学方向的把握，政策性建议的形成，等等，并帮助组织与提高今后会议成效，激励创新。

三、结 束 语

本文介绍了立足于综合集成方法论特别是面向定性综合集成所研究、设计并实现的群体研讨环境 GAE 及其应用于香山科学会议的一些分析结果。定性综合集成的一个目标就是获得对复杂问题的大胆假设，而实际中群体研讨活动是一种常见的操作性强的技术路径，也可视为是一种合作型的问题求解方法。GAE 首要目的就是支持合作型的群体研讨活动，更进一步，它通过 GAE-BAR，AIS-GAE 和 iView-GAE 等系列的工具提供了多种功能，尤其体现在：

通过可视化研讨结构扩展思维空间（直观化体现）；

通过多种聚类方法力图对研讨内容（发言及关键词）进行总结，便于研讨人员的再加工；

给出研讨成员参与程度的评价。尽管目前的评测指标有待于完善，而评价本身的目标是建立一种积分机制，便于今后组织研讨活动挑选恰当的人选。如研讨需要突出集思广益，则可考虑选择差异度高、具有相关知识的人员参与，而不仅仅依赖单位的提名推荐；

通过虚拟引导员干预研讨进程，力求影响参与成员贡献更多的思想，提高会议产出；

通过 Web 文本挖掘技术为研讨提供积极的信息支持，特别是推送式的信息服务；

通过创意网络所体现的知识图进一步给出研讨议题的一种结构分析；等等。

审视 GAE 的功能，对照创造力模型、相关创造过程的基本任务及 CSS 的研究，除必备的信息收集功能外，GAE 着重了“关联”功能的探索来支持以人为主的“创造”活动。作为利用计算机支持创造过程的研究，GAE 乃至 CSS 主要针对创造过程中的某些步骤、环节来竭力发挥机器之长，克服人与机器交互方面的障碍，体现人机结合，以人为主的思维方式或者问题求解方式的优越性。对于综合集成方法论之以结构化的序列去逼近非结构化问题的求解模式，GAE 通过各种方式探测“关联”信

息并可视化，展现演化的研讨过程，便于用户获取对各种支持结果的不同的领悟与见解，从而深入感知（perceive，aware）发散式问题研讨过程中群体互动的气氛（context），在这样的虚拟环境中展开丰富联想而达到思如泉涌的状态，为探索过程理性提供了一定的帮助。

目前 GAE 的功能仍很粗糙，需要进行更多的试验来验实不断研究而提炼的一些假设与概念模型，也需要综合一套完善的理论框架来系统诠释集智慧之大成及计算机支持的机理。考虑各种需求，GAE 的功能将不断丰富，而深入的改进即为了更多地探索过程理性，寻求相关机理。此外，GAE 也通过对收敛型群体思考的支持，如 NG 方法等来进一步提升支持群体活动的水平。

GAE 研究汲取了多种学科，如系统科学、知识科学（包括知识管理）、综合集成与复杂系统、复杂网络、社会网络等等的最新研究进展，并与一些研究相互借鉴，目前致力于扩展 iView 功能，即要考虑对照 GAE-BAR 中的发言人－关键词可视化关联，将关键词网络或者发言网络（根据引用关键词而构成的有向网络）与人际网络叠加成为一个复合网络，根据复合网络探测参与成员实际技能，或者结合时间演化考察研讨过程中关注点的迁移，这方面国际上也有类似的研究，如德国学者提出的 skillMap[19] 和日本学者首创的 Chance Discovery[20]，不过各自的出发点不同，设计与实现原理也有差异。此外，目前 GAE 研究尽管注重对研讨过程的支持，但并不能完全超越研讨进程，如对研讨结果给出某种程度的预测，或者对研讨过程提供更积极的信息支持，如根据某些 idea 而利用一些集成的模型给出一些定量计算或者仿真结果。文[21]已经开展了动态网络的研究。对于特定的支持对象，引入这样的研究可驱使 GAE 走向支持定性－定量相结合的综合集成。

本文所介绍的群体研讨环境（GAE）由作者及研究生自 2001 年秋历经 5 年的系统研究、自主设计研发，其中具体编程工作由研究生承担。在此向参与其中研究的同学，特别是刘怡君、张文表示衷心的感谢！

参考文献

[1] 唐锡晋：Towards Meta-Synthetic Support to Unstructured Problem Solving. In：Chen G Y, Cheng T C & Gu J F eds. Systems Science and Systems Engineering (proceedings of the 4th International Conference on Systems Science and Systems Engineering). Hong Kong：Global Link Publisher, November, 2003, 203－209

[2] 戴汝为：系统科学与思维科学交叉发展的硕果——大成智慧工程. 系统工程理论与实践，2002，22(5)：8－11

[3] 于景元，周晓纪：从定性到定量综合集成方法的实现和应用. 系统工程理论与实践，2002，22(10)：26－32

[4] 国家自然科学基金重大项目子课题“支持宏观经济决策综合集成方法体系与系统学研究”

(79990583)研究报告,2004年7月
[5] 刘怡君,唐锡晋:几种有关创造力的思维模型和支持工具介绍.系统工程理论与实践,2005,25(2):56—61
[6] Shneiderman, B. Creativity Support Tools. Communications of the ACM, 2002, 45(10):116—120
[7] Greene, S. Characteristics of Applications that Support Creativity. Communications of the ACM, 2002, 45(10):100—104
[8] Herbjørnsen, O. S. Software Support for Creativity. Depth Study for TDT 4735 System Engineering, Department of Computer and Information Science, Norwegian University of Science and Technology, November 28, 2003
[9] 唐锡晋,刘怡君:从群体支持系统到创造力支持系统.系统工程理论与实践,2006,26(5):63—71
[10] Burleson, W, Selker, T. Creativity and Interface (Introduction), Communications of the ACM, 2002, 45(10):89—90
[11] Mase, K, Sumi, Y, Nishimoto, K. Informal Conversation Environment for Collaborative Concept Formation. In: Ishida T eds. Community Computing: Collaboration over Global Information Networks, New York: John Wiley & Sons, Inc, 1998, 165—205
[12] 唐锡晋,刘怡君:Exploring Computerized Support for Group Argumentation for Idea Generation. In Nakamori Y, et al. eds. The Proceedings of the 5th International Conference on Knowledge and Systems Sciences. JAIST Press, November, 2004, 296—302
[13] 刘怡君,唐锡晋:Computerized Collaborative Support for Enhancing Human's Creativity for Networked Community. Internet and Network Economics (Proceedings of WINE 2005, X. Deng& Y. Ye eds.), LNCS 3828, Springer-Verlag, December, 2005, 545—553
[14] 张文:基于Web文本挖掘的信息支持工具及其应用,硕士学位论文,中国科学院数学与系统科学研究院,2006年6月
[15] 唐锡晋,刘怡君,Computerized Support for Qualitative Meta-synthesis as Perspective Development for Complex Problem Solving, Creativity and Innovation in Decision Making and Decision Support (proceedings of IFIP WG 8.3 International Conference on Creativity and Innovation in Decision Making and Decision Support, F. Adam, et al. eds.), Vol. 1, Decision Support Press, June, 2006, 432—448
[16] 唐锡晋,刘怡君,张文:Computerized Support for Idea Generation during Knowledge Creating Process, Knowledge-Based Intelligent Information & Engineering Systems (proceedings of KES' 2005, Part IV, R. Khosla, R. J. Howlett, and L. C. Jain eds.), LNAI 3684, Springer-Verlag, September, 2005, 437—443
[17] 刘怡君:创造力支持系统研究,博士学位论文,中国科学院数学与系统科学研究院,2006年5月
[18] Newman, M E J, Girvan M. Finding and Evaluating Community Structure in Networks, Physical Review E, 2004, 69:026113

[19] Meyer, B, Spiekermann, S, Hertlein, M. skillMap: Identification of parallel developments and of Communities of Practice in distributed organizations. In Gu, J F, Chroust, G. eds. Proceedings of the First World Congress of the International Federation for Systems Research (IFSR2005), JAIST Press, Japan, November, 2005, No. 2005. 3

[20] Ohsawa, Y, McBurney, P. eds. Chance Discovery, Springer, 2003

[21] Carley, K M, et al. Destabilizing Dynamic Covert Networks. In Proceedings of the 8th International Command and Control Research and Technology Symposium. Conference held at the National Defense War College, Washington DC, 2003. downloaded from http://www.sandia.gov/ACG/documents/papers/carley-2003-destabilizing.pdf

城市交通拥堵形成机理与演化规律研究中的系统科学方法

高自友

北京交通大学系统科学所，北京，100044

由于城市交通系统涉及到人、车、道路及管理控制系统等诸多因素，所以是一个典型的、开放的、复杂巨系统。而交通科学的本质和作用是深入理解复杂的交通行为，从个体行为到成千上万的聚集行为，尽管此过程很复杂，但只有将交通行为机理认识清楚了，才能真正认识城市交通拥堵背后的产生机理，才能有效地规划、控制和管理交通系统。因此要研究有效缓解城市交通拥堵的措施和对策，必须从系统科学研究思想出发，应同时从城市交通需求估计模型、道路交通流状态、网络交通流传播以及城市交通网络复杂性等方面进行系统而深入地研究城市交通拥堵的形成机理与演变规律，而不能片面地只考虑微观道路、网络或宏观网络结构等的各自特性。

一、引　言

钱学森院士是中国系统科学与系统工程事业的开创人与引路人，他在系统科学的发展、特别是系统学的开创方面，做出了创造性的贡献[1]，在他的领导和指引下，我国系统科学与工程在理论和实践上都取得了辉煌的成就。钱学森的系统科学思想，使人们认识到开放的复杂巨系统具有科学与经验相结合的本质，并指导人们运用一种科学的途径去寻求科学与经验相结合的解答。几年来通过构建学科框架和进行应用研究的实践，使我们在工作中深刻体会到他的系统科学与思维科学的高度影响力和前瞻性。

系统科学是一门研究复杂系统基本规律的综合性交叉学科，其基本任务是探索复杂性，寻找复杂系统中蕴含的简单规律，是当今世界的前沿性学科。对复杂系统开展建模、优化与分析是系统科学学科的主要任务之一，特别是结合或针对某些特定的复杂系统开展研究是国际上系统科学发展的主要趋势。由于交通运输系统是一个典型的开放的复杂巨系统，所以开展以系统理论为基础，以系统分析与集成技术为手段，通过对交通运输系统目标的分解、协调、综合、优化与实施而实现对现实复杂系统的建模与分析也是当今交通运输系统研究的主流与前沿。

二、复杂巨系统与城市交通系统

钱学森对系统科学最重要的贡献，是他发展了系统学和开放的复杂巨系统的方法论。钱学森对这一问题的兴趣起源于20世纪80年代初对军事对阵模拟的研究。在后来的研究工作中，钱学森赋予这一方法论更广泛的含义[1]：处理复杂行为系统的定量方法学，是科学理论、经验和专家判断力的结合。这种定量方法学，是半经验半理论的。提出经验性假设（猜想和判断），是建立复杂行为系统数学模型的出发点。这些经验性假设（猜想或判断）不能用严谨的科学方式证明，但需用经验性数据对其确实性进行检测。从经验性假设（猜想或判断）出发，通过定量方法途径获得的结论，仍然具有半经验、半理论的属性。当人们寻求用定量方法学处理复杂行为系统时，容易注重于数学模型的逻辑处理，而忽视数学模型微妙的经验含义或解释。要知道，这样的数学模型看来“理论性”很强，其实不免牵强附会，从而脱离真实。与其如此，反不如从建模一开始就老老实实承认理论的不足，而求援于经验判断，让定性的方法与定量的方法结合起来，最后定量。这样的系统建模方法是建模者判断力的增强与扩充，是很重要的。钱学森并没有把研究工作停止在这一水平上，他同于景元、戴汝为等合作，深入到一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论（参见《自然杂志》13卷1期）。钱学森在1989年指出，实践已经证明，现在能用的、唯一能有效处理开放的复杂巨系统（包括社会系统）的方法，就是从定性到定量的综合集成方法，这个方法是在复杂巨系统研究实践的基础上，提炼、概括和抽象出来的[8]。

在各类复杂巨系统的研究和应用中，通常是科学理论、经验知识和专家判断力相结合，先提出经验性假设（判断或猜想）；然而这些经验性假设不能用严谨的科学方式加以证明，往往只是定性的认识，但可用经验性数据和资料，以及几十、几百、上千个参数的模型对其确实性进行检测；而这些模型也必须建立在经验和对系统的实际理解上，经过定量计算，通过反复对比，最后形成结论；这样的结论就是我们在现阶段认识客观事物所能达到的最佳结论，是从定性上升到定量的认识。定性定量相结合的综合集成法，就其实质而言，是将专家群体（包括各种有关专家）、数据和各种信息与计算机技术有机地结合起来，把各种学科的科学理论和人的经验知识结合起来。这个方法应用的成功，就在于发挥了这个系统的整体优势和综合优势[2]。近几年，国外有人提出综合分析方法（Meta—analysis），对不同领域的信息进行跨域分析综合，但还不成熟，方法也太简单。而从定性到定量的综合集成方法却是真正的综合分析方法。钱学森在1992年进而提出了从定性到定量的综合集成法的应用形式。钱学森的系统科学思想，使人们认识到复杂巨系统具有科学与经验相结合的本质，并指导人们运用一种科学的途径去寻求科学与经验相结合的解答[2]。

现在能用的、唯一处理开放的复杂巨系统(包括社会系统)的方法,是把许多人对系统的点点滴滴的经验认识,即往往是定性认识,与复杂系统的几十、上百、几百个参数的模型,即定量的计算结合起来,集腋成裘,通过研究者的反复尝试,并与实际资料数据对比,最后形成理论。在这个过程中,不但模型计算要用大型电子计算机,而且就是在反复尝试抉择中,也要用计算机帮助判断选择。这就是所谓定性与定量相结合的处理开放的复杂巨系统的方法[2]。这一项重要基础科学研究就应该从这样一种实践经验出发,认真提高总结,建立一个基础理论。这可以是系统科学的基础学科,同时也是科学方法论的重要发展。

由于城市交通系统涉及到人、车、道路及管理控制系统等诸多因素,所以是一个典型的、开放的、复杂巨系统。尽管当前我国一些城市正竭尽全力,投入巨资,多修道路、控制车辆及其行驶方式,寻求交通拥堵的破解之法。然而,当前城市交通拥堵"病情"不仅毫无缓解,还在雪上加霜,一些大城市甚至出现"路通到哪,车堵到哪"怪现象,凸现出"到底路堵车,还是车堵路"的交通迷思,更加让人百思难解。负责主持制订北京交通发展规划的北京市交通发展研究中心主任全永燊教授曾这样写道:"我们对城市交通发展的属性特征及其自身发展的内在规律还缺乏足够的、准确的认识。因此,我们解决交通问题的思路和具体方法就难免带有一定的盲目性,事倍功半(甚至事与愿违)也就是自然的结果了。"事实上,由于城市交通系统涉及到人、车、道路及管理控制系统等诸多因素,所以城市交通拥堵现象的产生和演变过程极其复杂,其中蕴涵着大量的基础科学问题,而交通科学的本质和作用是深入理解复杂的交通行为,从个体行为到成千上万的聚集行为,尽管此过程很复杂,但只有将交通行为机理认识清楚了,才能真正认识城市交通拥堵背后的产生机理,才能有效地规划、控制和管理交通系统。而当前我国城市交通战略的缺失、中心城区土地的野蛮开发、管理和控制系统的严重滞后、道路资源的低效率配置等等因素,正是"城市交通病"的病因所在,不彻底摈弃当前城市交通规划和建设中普遍存在的"大经验,小科学",甚至是用行政手段搞城市交通建设的常规,不重视科学、理性、前瞻的交通战略规划,城市将永远走不出"车路挤兑"的怪圈。因此要研究有效缓解城市交通拥堵的措施和对策,不能片面地只考虑微观道路、网络或宏观网络结构等各自的特性,而必须利用系统科学的原理和方法对城市交通系统开展深入系统的理论和应用研究,即应同时从城市交通需求估计、道路交通流、网络交通流以及城市交通网络复杂性等诸多方面进行系统深入地研究城市交通拥堵的形成机理与演变规律,要特别注意将城市交通需求估计模型、道路交通流状态、网络交通流模型与复杂交通网络演化相结合进行系统而深入地研究。具体来讲,研究城市交通系统就必须要以系统理论为基础,以系统分析与集成技术为手段,通过对交通运输系统目标的分解、协调、综合和优化,实现对现实复杂交通系统的建模与分析,并在此基础上有效地规划、控制和管理现实城市交通系统。

三、用系统科学的方法研究城市交通系统

城市交通系统随着城市的形成而产生，随着社会的进步而演化，是一个典型的、开放的复杂巨系统。自 20 世纪 50 年代以来，由于城市机动车数量的快速增加，城市交通拥挤逐步加剧，交通科学才引起人们的真正重视。世界各国学者在交通流理论、交通需求预测、交通规划与管理、交通控制、交通模拟与仿真、智能交通系统等方面已做了大量的理论研究与应用工作，近年来关于复杂网络研究工作的迅猛发展也使人类对自然界和复杂社会行为的认识产生了新的飞跃，并已取得了重要的进展。然而，现有的研究成果还不足以充分准确地模拟和阐释复杂的交通流和交通拥挤现象的形成过程，对当前城市交通拥堵问题的解决还存在相当的局限性和被动性。因此，还必须利用系统科学的原理和方法对城市交通系统开展深入的理论和应用研究，来真正认识城市交通拥堵背后的机理，为此必须特别注意将城市交通需求估计、道路交通流状态、网络交通流传播与复杂交通网络结构演化相结合[9]（见图 1），进行“一体化”的深入研究，在此基础上，来系统深入地探讨城市交通拥堵的形成机理与演变规律，为相关国民经济领域服务。下面就以图 1 为例，并结合我国大城市交通系统的一些运行特点分别对城市交通需求估计模型、道路交通流状态、网络交通流传播与复杂交通网络结构演化等四个方面作简要介绍。

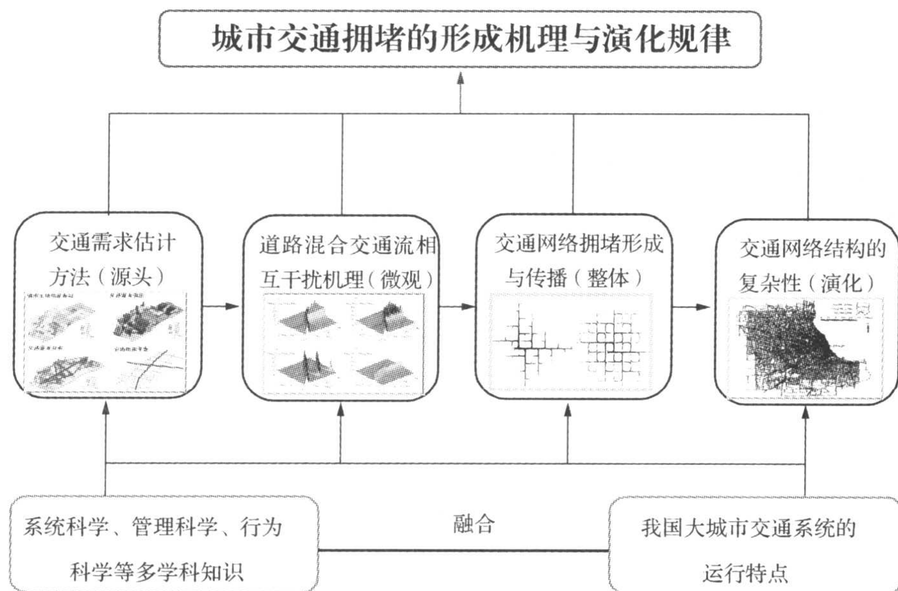


图 1　城市交通拥堵形成与演化研究中的系统科学方法框架

1. 城市交通需求

城市交通拥挤现象以道路交通流为表征，道路交通流因城市居民出行和货物的移动（即交通需求）而形成，关于交通需求的形成机理研究构成所有后续研究的前提和基础。国际上对城市交通需求的分析与预测，近 50 年来普遍采用“四阶段”模型[3,4]，即出行产生、出行分布、出行方式划分和交通分配四个阶段。城市用地布局与交通生成的互动关系是交通需求分析的重点，很早就有学者认为城市交通是土地利用的函数，通过比较不同城市形态的交通需求，确定交通网络结构和交通政策的发展方向，引导城市交通需求和交通供给的分布，预防交通瓶颈的产生。20 世纪 80 年代以后，这类研究进一步延伸至居民的日常活动与交通行为，强调居民的交通行为不仅受制于空间形态，而且受限于时间窗口，为此提出了“一阶段”交通需求分析模型，但尚未形成完整的理论体系。国内的相关研究侧重于“四阶段”模型在现代社会环境下应用的可行性与可靠性分析，并开始考虑信息化条件及城市可持续发展保障体系对交通需求的影响，提出了一些修正传统模型的思路，但体系还不完整，理论深度也不够。

社会的高度信息化发展已经并将进一步对城市居民的出行行为产生重大影响，交通需求的产生、吸引、方式选择和路径选择间的关系变得密不可分，同时具有更为复杂的可变性，迫切需要依托基础性研究工作探寻出行行为的基本规律，深刻认识交通需求与供给之间的作用机理，重构交通需求分析的理论模型。国际上对这方面的研究还处于起步阶段，将是未来发展的重要方向。

2. 道路交通流

道路交通流是从微观角度揭示速度、密度和流量三个参数之间的瞬态和稳态关系，再现各种局部交通拥堵现象的发生和发展过程以及研究混合交通流相互干扰机理，它主要从车辆相互作用下的个体行为和集体平均行为两方面进行，前者包括车辆跟驰模型和元胞自动机模型（或称粒子跳跃模型），后者包括各种交通流连续模型。近年来发展的重要模型有：优化速度模型、相对速度模型、广义力模型、全速度差模型、元胞自动机交通流模型等[6]。

连续交通流模型视交通流为大量车辆构成的可压缩连续流体介质，研究许多车辆的集体平均行为。经典的 Lighthill-Whitham-Richards 理论通过求解流体力学的连续性方程建立了流量与密度之间的关系，可以捕捉交通激波形成和阻塞疏导等特性。Payne 在 1971 年从车辆跟驰模型出发，得到一个以密度梯度作为期望项的描述加减速的运动方程，与连续性方程一起构成所谓的高阶连续模型，可以用来研究交通流的许多非线性传播特性。随后，许多学者改进了这一模型。

我国学者近年来积极研究道路交通流理论，物理学界、力学界、数学界和系统科

学界的一批学者非常活跃。我国学者在车辆跟驰模型、元胞自动机模型、速度梯度连续模型、多车道动力学模型、小扰动传播速度等方面的工作，解决了一些国外模型存在的问题。

但是，由于问题的复杂性，许多问题仍然没有很好解决，如机动车、非机动车及行人之间的相互干扰机理问题。研究拥堵模式的宏观时空特征，探寻各种类型拥堵模式之间的转换随时间的演化规律是理解城市拥堵形成机理的关键。研究发现，车流拥堵模式的时空结构具有可预测的特征，在强拥堵中，同步流的流量可以自发维持在一个极限流量，而一般模式中的同步流区域的平均宽度并不依赖于交通需求，同步流和宽运动堵塞的参数之间存在关联。强拥堵通常出现于一般模式中，而弱拥堵通常出现于同步流模式中。弱拥堵通常可以在下匝道处观察到，而强拥堵则经常出现在上匝道处。如何建立能够与经验观察一致的城市高架环行道的交通流模型并再现所观察的时空演化复杂性和结构瓶颈特征应该是解决中国城市交通拥堵瓶颈问题的最基础的一步。

3. 网络交通流

网络交通流源于道路交通流，虽然道路交通流与网络交通流是相互依存的，但整个网络的特性却不等于所有微观特性的简单求和，也更具挑战性，也更具现实意义。主要强调的是从网络整体上把握交通拥堵形成与传播。主要研究出行者在各种环境和政策下，如何决定出发时间和路径，如何选择交通工具，最后导致怎样的路段流量分布，将巨大数量的微观离散个人决策结果转化为宏观网络聚集现象。网络交通流的形成机理研究更多地涉及人的行为，而复杂的交通行为受信息、价值标准、判断准确性以及理性程度的综合影响。网络交通流研究的基本发展历程是：路径选择的用户均衡原理与等价数学规划模型（始于 1950 年代），随机效用理论（始于 1960 年代），组合网络模型（始于 1970～1980 年代），网络设计问题的模型与求解（始于 1970～1980 年代），随机均衡分配模型（始于 1980 年代），动态交通分配模型（始于 1990 年代），拥挤道路使用收费理论与模型（始于 1990 年代），基于活动（activity-based）的建模技术（始于 1990 年代）[4,5,6]。

围绕交通分配展开的研究，几十年来一直是网络交通流研究的基本模式。将择路原则与一定的约束结合起来，可以形成丰富多彩的研究方案，如：路段通行能力受限制、允许路段之间流量相互影响、将 OD 阵与交通分配组合起来、时间与成本双准则交通分配、变分不等式模型、用双层规划将交通分配与交通政策结合起来、建立在均衡交通分配上的拥挤收费、公交网络流量分配与网络设计问题结合起来等等。网络交通流的解析模型与算法研究，加深了人们对系统整体性的认识，但实现起来比较困难，为此许多城市交通规划软件采用了模拟方法。模拟方法与解析方法并不矛盾，模拟法则来源于人们对交通行为、网络特性的深刻认识。用于规划目的的网络

流模型大都是静态的，目前最热门的研究方向是动态网络流模型，可以揭示拥堵的形成与传播过程。

4. 城市交通系统的时空演化复杂性

这方面研究与现代统计物理学、非线性动力学及复杂网络研究的关系特别密切。20世纪七八十年代以来，随着非平衡态统计物理学和非线性科学以及计算机科学的进展，特别是相变与临界现象、非平衡过程、自组织临界性、非线性动力学、元胞自动机模型以及复杂网络的提出和深入研究，为城市交通这一复杂系统的研究开辟了新途径。欧美日的科学家在考虑阻尼噪声、密度涨落、车辆群集、双向通道、路障及部分慢速车的各种情况下对交通流的元胞自动机模型进行了数值模拟与统计力学解析。

各种复杂网络的拓扑结构、动力学以及复杂网络上各种流的传播行为研究是当前复杂网络研究和交通流研究的交叉科学前沿问题。人们已经发现，自然界和社会中存在的大量网络既不是规则网络也不是随机网络，而是介于这两个极限之间的小世界网络和无标度网络。小世界现象非常普遍[7]，城市交通系统和各种复杂网络都是典型的小世界。小世界动态网络的结构、动力学和功能的相互作用研究对于城市交通拥堵瓶颈问题的研究有直接的关系。通过对交通运输网络的时空演化动力学和可能的瓶颈结构进行研究，可以指导网络和交通系统的改造和规划工作，充分考虑网络及交通系统的生长机制和交通网络的拓扑特性，做到既不损害出行者的利益，又兼顾决策者的整体利益，既保持交通网络发展的灵活性，又维护它的可靠性和结构稳定性。

国外已有很多学者对网络复杂性进行了大量理论研究，有的还从实证的角度进行了相关分析，但就交通复杂系统而言，相关研究成果还比较少。而就国内来讲，城市交通系统方面的复杂性研究相对较少。总体上来讲，基于交通行为特征的交通网络复杂性研究尚处于起步阶段，对交通动力学行为特性与拓扑结构的相互作用做进一步深入研究仍有巨大潜力。特别值得指出的是，近年来，关于 Internet 的拥塞机理及其拥塞控制研究，已引起国内外的计算机网络研究者、非线性科学工作者和控制理论等专家的广泛关注，并由此在全球范围内掀起了一股研究 Internet 网络的拥塞控制理论与方法的热潮。这方面的研究文章已有很多。然而相比较 Internet 的拥塞机理及其拥塞控制研究而言，关于复杂交通系统的拥堵机理及其控制研究而言，现有研究成果极为罕见。

总而言之，作为开放的复杂巨系统的城市交通系统，组成该系统的各个子系统之间的相互作用花样繁多，各式各样；系统的不同层次之间也是相互关联、相互影响。因此，我们在研究城市交通系统这个典型的、开放的、复杂巨系统时，必须利用系统科学的原理和方法，将交通出行者的行为特性、专家群体（包括各种有关专家）、

数据和各种信息与计算机技术、管理与控制手段有机地结合起来，把各种学科的科学理论和人的经验知识结合起来，发挥系统的整体优势和综合优势；利用复杂巨系统的方法论、定性与定量相结合的处理方法，通过反复尝试，并与实际资料数据对比，从实践经验出发，综合集成，为缓解和预防困扰世界大城市的交通拥堵问题寻找真正的出路。

四、总　结

总之，要认识复杂的、开发的城市交通系统，就必须从理论上深入研究大城市交通需求生成机理及道路交通流的非线性动力学特性，刻画路网交通拥堵的形成机理与传播特性，同时探讨大城市交通系统的时空演化复杂性与结构瓶颈之间的相互关系，并提示城市交通系统拥堵的形成机理与演化规律，从而找出城市交通拥堵的确切“病因”。之所以应采用这样基于系统科学的研究思路，主要是基于下述原因：

1. 城市交通供需矛盾和城市交通网络布局的不合理是大城市交通拥堵产生的主要原因

城市网络交通流是交通需求和交通供给在现有交通管理政策下在交通网络上的具体实现结果。交通需求的出行分布与强度源于社会与经济活动、人口的增长、城市的形态与土地利用和开发强度，以及出行者的行为；交通供给取决于城市规划、交通设施的建设水平和管理水平等；城市规划、交通规划、交通建设和交通管理与控制的结果，决定着城市交通系统的未来发展和演化趋势。因此，可以通过城市交通需求管理、路网交通的管理与控制以及城市交通系统的发展战略规划来动态调整交通需求的时空分布与强度，构建合理的网络布局，实现交通需求与交通供给的动态均衡，尽可能消除频发性交通瓶颈，达到缓解与预防城市交通拥堵发生的目的。

2. 城市交通瓶颈、交通拥堵的产生与道路交通流的状态紧密相关

道路交通流是城市网络交通流在各条道路上的具体体现。道路交通流的基本特征参数——交通流的密度、速度和流量是衡量道路交通拥堵程度的三大重要指标，速度与密度（或流量与密度）之间有非常复杂的非线性动力学关系。而城市交通瓶颈的产生与交通拥堵引发的环境污染、交通事故频发，其严重程度也都与道路交通流的基本特征参数有着非常密切的关系。所以，要从本质上认识具体道路拥堵的形成机理与传播，必须深入进行道路交通流的非线性动力学特性研究，以便更深入地掌握交通流的演化特征。其理论成果可以指导局部交通设计、管理和控制，起到缓解和预防道路拥堵产生的关键性作用，并可直接用于先进的路网交通流研究。

3. 城市交通瓶颈、交通拥堵的产生与网络交通流的演变过程密不可分

城市交通系统是一个复杂、开放、随机、动态、自适应和具有突变特征的系统。尽管进行道路交通流的特征研究极为重要,但整个路网的特性却不等于所有道路交通流微观特性的简单叠加。因此,当把道路交通流的研究成果推广到整个网络范围时,变数就更多了。路网交通流的形成机理和演变过程研究更多地涉及人的行为,而复杂的交通行为受信息、价值观、判断准确性以及理性程度的综合影响。因此,必须深入研究局部交通拥堵如何演变为网络性拥堵的形成机理,以及进一步大范围扩展的条件和基本规律,并分析路网拓扑结构、瓶颈通行能力以及随机波动等因素在网络上对交通拥堵传播的影响。关于网络交通流研究的理论成果可以指导整个路网的交通设计、管理和控制,对缓解与预防路网城市交通瓶颈与交通拥堵的产生将起到决定性的作用。

综上所述,缓解与预防城市交通瓶颈与交通拥堵产生的理念主要包括四种途径:①通过城市交通需求科学管理、路网交通的科学管理与控制以及城市交通系统的发展战略规划来动态调整交通需求的时空分布与强度,构建合理的网络布局,实现交通需求与交通供给的动态均衡,尽可能消除频发性交通瓶颈,达到缓解与预防城市交通拥堵发生的目的;②在深入揭示道路交通流的形成机理与演变过程的基础上,采取科学的方法控制、调节道路交通流来缓解城市交通的局部交通瓶颈和交通拥堵的产生;③在全面深入地揭示城市路网交通瓶颈、交通拥堵的形成机理与传播过程的基础上,采取科学的管理与控制措施来系统地调节路网交通流,优化整个城市交通系统资源利用,缓解整个城市交通网络拥堵的发生;④在深入揭示城市交通系统的时空复杂性与结构拥堵瓶颈演化分析的基础上,结合城市交通系统本身的演化特性,预测城市交通系统与拥挤瓶颈的演化趋势过程,通过城市交通发展战略规划来调整交通需求的分布与强度、构建合理的交通网络布局,达到科学预防城市交通拥堵的目的。简单来讲,对城市交通拥堵问题一定要做到系统研究,科学管理。

参 考 文 献

[1] 钱学森:论系统工程(增订本). 长沙:湖南科技出版社,1988 年
[2] 钱学森:再谈开放的复杂巨系统. 模式识别与人工智能,4(1):1—4,1991 年
[3] 黄海军,顾昌耀:城市交通需求分析方法论的发展. 中国公路学报,8 (1):31—39,1995 年
[4] 黄海军:城市交通网络平衡分析:理论与分析. 北京:人民交通出版社,1994 年
[5] 高自友,宋一凡,四兵锋:城市交通连续平衡网络设计理论与方法. 北京:中国铁道出版社,2000 年
[6] 高自友,任华玲:城市动态交通流分配模型与算法. 北京:人民交通出版社,2005 年

[7] Watts D. J. and Strogatz S. H. (1998) Nature, 393: 440; Barabasi A. L. and Albert R. (1999) Science, 286: 509

[8] 中国公众科技网:中国科学技术专家传略—钱学森,2006年
www.cpst.net.cn/kxj/zgkxjszj/CX/gxb/pe/lx21011008.htm

[9] 高自友,赵小梅,黄海军:复杂网络与交通网络复杂性,北京交通大学系统科学研究所技术报告(内部资料),2006年

编后记

钱学森是中国现代史上一位杰出的科学家和思想家,也是我国系统科学学科的开创者和奠基人。我国系统科学在钱学森系统科学思想指引下,已有了长足的发展,在全国系统科学界的努力下,无论在工程应用方面还是在基础理论方面的研究,都取得了丰硕成果和经验,印证了钱学森系统科学思想的强大生命力。

2006年是钱老95岁华诞,为了表达对人民科学家钱学森的敬意,为了弘扬钱老的系统科学思想,我国系统科学界的部分同志,撰写了研究应用钱学森系统科学思想的心得体会,汇集成《钱学森系统科学思想研究》,作为"钱学森系统科学思想文库"第四卷。

本卷的内容大体分为四个部分:A部分是侧重对钱学森系统科学思想发展的综述;B部分是系统论层面的文章,阐述了系统科学通向马克思主义哲学方面的体会;C部分是系统理论方面的议题和思想,既有基础理论(系统学)方面的,也有相当于系统科学的技术科学层次的一些提炼;D部分是系统工程方面的成果和经验。把诸多专题分别归入这些部分不完全贴切,主要是为了使读者阅读方便。收入的文稿,在体例和格式上作了少量修改,以力求统一。各部分的文章按姓氏笔画为序。

限于时间和篇幅,未能更充分反映有关单位和同志的成果和情况,尚祈鉴谅!

[G e n e r a l I n f o r m a t i o n]
书名＝钱学森系统科学思想研究
作者＝中国系统工程学会　　上海交通大学编
页数＝３１８
ＳＳ号＝１１８０９０２５
出版日期＝２００７年０１月第１版

前言
目录